
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

Aplicação de software CAD/CAE na concepção de ferramentas de estampagem – um estudo de caso

Por

Nuno Miguel Ribeiro de Sousa Sarafana

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor António José Freire Mourão

Lisboa

2010

Aplicação de software CAD/CAE na concepção de ferramentas de estampagem – um estudo de caso

Resumo

Este estudo pretende analisar o potencial existente na aplicação de *software* CAD/CAE na actividade da concepção de ferramentas de estampagem.

Com o aumento da complexidade de projecto e com as solicitações do mercado no sentido da redução dos tempos de resposta, o uso de ferramentas computacionais sofisticadas torna-se cada vez mais uma necessidade. É apresentado um estudo comparativo de seis *software* distintos, com base nas suas características funcionais e analisado o tipo de aplicação a que cada um mais se adequa. Para tirar o máximo partido da utilização destes *software*, são apresentadas diferentes metodologias de trabalho, que devem ser seguidas aquando da aplicação dos mesmos.

Destes *software* são utilizados três - Logopress3, Fastform Advanced, e Dynaform – em aplicações concretas em ferramentas concebidas recentemente por uma empresa de projecto e fabrico de ferramentas. Foi possível comparar os resultados do estudo com a realidade da empresa nesta actividade.

Os resultados alcançados foram bastante esclarecedores: redução substancial de tempo de desenvolvimento de projecto, possibilidade de análise de diferentes propostas de solução em tempo útil e detecção precoce de falhas.

Palavras-chave: Projecto de ferramentas de estampagem; *Software* CAD/CAE; Engenharia Simultânea

Application of CAD/CAE software in the conceptual design of stamping tools – a case study

Abstract

This study aims to analyze the potential in the application of CAD/CAE *software* in the design of stamping tools.

With the increasing complexity of design and with market demanding faster lead times, the use of sophisticated computational tools becomes more and more a necessity. This study compares six distinct *software* packages, based on their functional features and the type of applications that they fit best. To take full advantage of these tools, different methodologies of work are presented that must be followed when implementing them.

Of the six, three - Logopress3, Fastform Advanced, and Dynaform – are used in three real cases of application in parts recently designed by a project and development company. It was possible to compare the results of this study with the present solution used in the company.

The results were very clear: substantial reduced time of project development, the possibility of analyzing different solutions in useful time and early flaw detection.

Keywords: Design of stamping tools; CAD/CAE *software*; Concurrent Engineering

Agradecimentos

Começo por exprimir o meu agradecimento ao Professor Doutor António José Freire Mourão, pelo desafio que me lançou e pelo apoio oferecido ao longo da presente dissertação.

Agradeço ao Engenheiro Vítor Pereira por me ter acolhido na APAL – Cunhos e Cortantes Lda., e a todos aqueles que durante o período de um ano em que estive na empresa, se mostraram sempre disponíveis a ajudar.

Gostaria ainda de expressar a minha imensa gratidão a toda a minha família e amigos, com cujo apoio incondicional sempre pude contar, e que em muito ajudaram a tornar esta dissertação numa realidade.

A todos,

Muito Obrigado

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	A Indústria de Estampagem	1
1.2.1	Considerações Gerais.....	1
1.2.2	O Sector das Ferramentas de Estampagem	3
1.3	Objectivos da Dissertação	6
1.4	Organização da Dissertação	8
2	Análise dos Principais <i>Software</i> Comerciais.....	9
2.1	Enquadramento.....	9
2.2	Evolução dos <i>Software</i>	12
2.3	Funcionalidades Existentes nos <i>Software</i>	13
2.3.1	Planificação (<i>Blank</i>).....	13
2.3.2	Distribuição das Peças Planificadas (<i>Nesting</i>).....	14
2.3.3	Simulação da Capacidade de Enformação (<i>Formability Simulation</i>).....	16
2.3.4	Análise da Recuperação Elástica (<i>Springback Analysis</i>).....	18
2.3.5	Projecto da Matriz (<i>Die Designer</i>).....	20
2.3.6	Análise da Ferramenta (<i>Die System Analysis</i>)	21
2.3.7	Planificação de Peças (<i>Flattening Part</i>).....	23
2.3.8	Criador de Banda (<i>Strip Creator</i>)	24
2.3.9	Criador de Ferramenta (<i>Tool Creator</i>).....	25
2.4	Comparação Funcional de <i>Software</i>	26
2.4.1	Introdução	26
2.4.2	Análise Comparativa.....	27
2.4.3	Conclusões	31

3	Metodologias de Trabalho: Correntes na Empresa e Propostas	36
3.1	Metodologias Correntes na Empresa	36
3.1.1	Apresentação da Empresa.....	36
3.1.2	Metodologia de Trabalho na Empresa.....	36
3.2	Abordagens Propostas.....	40
3.2.1	Abordagem para <i>Software</i> não Autónomos.....	40
3.2.2	Abordagem para <i>Software</i> Autónomos.....	42
4	Casos de Estudo.....	45
4.1	Introdução	45
4.2	Caso 1- Análise Experimental ao Logopress3	45
4.2.1	Verificação de Detalhes Problemáticos.....	46
4.2.2	Potencialidades do Logopress3 para Peças Não-Simples	48
4.2.3	Desenvolvimento da Banda para uma Peça Simples.....	52
4.2.4	Conclusões.....	60
4.3	Caso 2- Análise Experimental ao Fastform Advanced	61
4.3.1	Introdução	61
4.3.2	Preparação da Simulação.....	62
4.3.3	Resultados.....	65
4.3.4	Conclusões.....	72
4.4	Caso 3- Análise Experimental ao eta/Dynaform	72
4.4.1	Introdução	72
4.4.2	Preparação da Simulação.....	74
4.4.3	Resultados.....	78
4.4.4	Conclusões.....	81
5	Conclusões.....	83
6	Bibliografia	85

Índice de Figuras

<i>Fig. 1.1 – Exemplos de peças simples.....</i>	<i>4</i>
<i>Fig. 1.2 – Exemplos de peças complexas.....</i>	<i>4</i>
<i>Fig. 1.3 – Principais factores que os fornecedores indicam como de maior importância para os seus clientes [4]</i>	<i>5</i>
<i>Fig. 1.4 – Enquadramento da dissertação (a cinzento) num trabalho alargado sobre projecto de ferramentas de estampagem</i>	<i>7</i>
<i>Fig. 1.5 – Esquema simplificado do processo de fabrico de uma ferramenta de estampagem</i>	<i>7</i>
<i>Fig. 1.6 – Informação versus custo de alterações durante o desenvolvimento do produto [5]</i>	<i>8</i>
<i>Fig. 2.1 - Processo de fabrico de uma ferramenta (versão sem simulação).....</i>	<i>10</i>
<i>Fig. 2.2 - Processo de fabrico de uma ferramenta (versão com simulação)</i>	<i>11</i>
<i>Fig. 2.3 - Investir no projecto para reduzir o custo e o tempo de lançamento do produto (adaptado de [9]).</i>	<i>12</i>
<i>Fig. 2.4 – Exemplo do contorno da planificação de uma peça [11].....</i>	<i>13</i>
<i>Fig. 2.5 – Exemplo de um relatório final de nesting [11].....</i>	<i>15</i>
<i>Fig. 2.6 – Análise da capacidade de enformação de uma peça em Autoform [14]</i>	<i>16</i>
<i>Fig. 2.7 – Exemplo de um gráfico FLD [15]</i>	<i>17</i>
<i>Fig. 2.8 – Exemplo de análise de resultados wrinkling [15]</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 2.9 – Exemplo de análise de resultados thickness [15].....</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 2.10 – Análise ao springback de uma peça [14]</i>	<i>19</i>
<i>Fig. 2.11 – Aplicação do springback compensation num componente estrutural [14]</i>	<i>20</i>
<i>Fig. 2.12 – Ciclo de uma avaliação rápida do painel exterior de uma porta, com indicação da localização do addendum e do binder (Dynaform) [8].....</i>	<i>21</i>
<i>Fig. 2.14 – Análise à integridade estrutural de uma ferramenta (Dynaform) [17]</i>	<i>22</i>
<i>Fig. 2.13 – Análise da remoção dos desperdícios de corte (Dynaform) [17].....</i>	<i>22</i>
<i>Fig. 2.15 - Exemplo de planificação de uma peça (Logopress3) [18].....</i>	<i>23</i>
<i>Fig. 2.16 – Diferentes passos de planificação (Logopress3) [18].....</i>	<i>23</i>
<i>Fig. 2.17 – Exemplo de banda (Logopress3) [18].....</i>	<i>24</i>
<i>Fig. 2.18 – Criação dos punções sobre a banda (Logopress3) [18]</i>	<i>24</i>
<i>Fig. 2.19- Exemplo de banda para peças com simetria axial (Logopress3) [18].....</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 2.21 – Criação de uma ferramenta (Logopress3) [18]</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 2.20- Exemplos de componentes standard da biblioteca [18]</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 2.22 - Processo de selecção do software (versão módulos).....</i>	<i>34</i>
<i>Fig. 2.23 – Esquema de selecção do software para a concepção de ferramentas de estampagem</i>	<i>35</i>
<i>Fig. 3.1 – Fluxograma de projecto e fabrico de uma ferramenta [21].....</i>	<i>38</i>
<i>Fig. 3.2 – Fluxograma de trabalhos no gabinete técnico de projectos.....</i>	<i>39</i>

<i>Fig. 3.3 – Fluxograma de trabalhos no gabinete técnico de projectos para software não autónomos</i>	41
<i>Fig. 3.4 – Grupo de trabalho para análise dos resultados da simulação</i>	43
<i>Fig. 3.5 – Fluxograma de trabalhos para software autónomos</i>	44
<i>Fig. 4.1 – Menu do Logopress3</i>	46
<i>Fig. 4.2 – Fotografias da peça A</i>	46
<i>Fig. 4.4 – Mensagem de erro no desdobramento da peça A</i>	47
<i>Fig. 4.3 – Indicação das linhas de dobra da peça A</i>	47
<i>Fig. 4.5 – Indicação da linha de dobra da peça B</i>	48
<i>Fig. 4.6 – Desenho CAD e fotografia da peça C</i>	49
<i>Fig. 4.7 – Preparação da peça C para planificação (Logopress3)</i>	49
<i>Fig. 4.8 – Comparação entre dois planificados da peça C</i>	50
<i>Fig. 4.9 – Resultados da simulação da tensão ao longo da peça C (Logopress3)</i>	51
<i>Fig. 4.10 - Resultados da simulação do deslocamento ao longo da peça C (Logopress3)</i>	51
<i>Fig. 4.11 – Fotografia de detalhe da peça C</i>	51
<i>Fig. 4.12 – Desenho CAD da peça “simples” D</i>	52
<i>Fig. 4.13 – Estado inicial da peça D nos postos 7 e 8</i>	53
<i>Fig. 4.14 – Estado inicial da peça D no posto 6</i>	54
<i>Fig. 4.15 – Estado inicial da peça D no posto 5</i>	54
<i>Fig. 4.16 – Estado inicial da peça D no posto 4</i>	55
<i>Fig. 4.17 – Part preparation (peça D)</i>	55
<i>Fig. 4.18 – Menu de edição da banda</i>	56
<i>Fig. 4.19 – Perspectiva da banda da peça D com punções incluídos</i>	57
<i>Fig. 4.20 – Desenho da banda da peça D obtido pelo método tradicional na empresa</i>	59
<i>Fig. 4.21 - Desenho da banda da peça D obtido pelo Logopress3</i>	59
<i>Fig. 4.22 – Fotografias da peça E</i>	61
<i>Fig. 4.23 – Fastform Advanced após a importação inicial da peça</i>	62
<i>Fig. 4.24 – Características do material usado na peça E (base de dados do Fastform Advanced)</i>	63
<i>Fig. 4.25 – Remoção dos furos da peça E (Fastform Advanced)</i>	63
<i>Fig. 4.26 – Mesh da peça E (Fastform Advanced)</i>	64
<i>Fig. 4.27 – Tipping da peça E (Fastform Advanced)</i>	64
<i>Fig. 4.28 – Planificação da peça E (Fastform Advanced)</i>	66
<i>Fig. 4.29 – Planificado da peça E com diferentes geometrias de contorno (Fastform Advanced)</i>	66
<i>Fig. 4.30 – Percentagem da variação da espessura da peça E (Fastform Advanced)</i>	67
<i>Fig. 4.31 – Espessura da peça E no ponto 1 (Fastform Advanced)</i>	67
<i>Fig. 4.32 – Fotografia da medição da espessura do ponto 1 (peça E)</i>	68
<i>Fig. 4.33 - Espessura da peça E no ponto 2 (Fastform Advanced)</i>	68
<i>Fig. 4.34 - Fotografia da medição da espessura do ponto 2 (peça E)</i>	69
<i>Fig. 4.35 – Tensão equivalente em MPa da peça E (Fastform Advanced)</i>	69
<i>Fig. 4.36 – Fotografia de detalhe da sobreposição de material na peça E</i>	70

<i>Fig. 4.37 – Springback da peça E numa perspectiva lateral da peça (Fastform Advanced).....</i>	<i>70</i>
<i>Fig. 4.38 - Springback da peça E numa perspectiva frontal da peça (Fastform Advanced)</i>	<i>71</i>
<i>Fig. 4.39 – Deslocamento 3D (mm) do springback da peça E (Fastform Advanced)</i>	<i>71</i>
<i>Fig. 4.40 – Fotografia da peça F.....</i>	<i>73</i>
<i>Fig. 4.41 – Sequência de fabrico da peça F</i>	<i>73</i>
<i>Fig. 4.42 – Geometria da chapa plana (Caso 3)</i>	<i>74</i>
<i>Fig. 4.43 – Geometria do punção (Caso 3)</i>	<i>75</i>
<i>Fig. 4.44 – Geometria do pisa (Caso 3)</i>	<i>75</i>
<i>Fig. 4.45 – Geometria da matriz (Caso 3).....</i>	<i>75</i>
<i>Fig. 4.46 – Menu de setup inicial (Caso 3).....</i>	<i>76</i>
<i>Fig. 4.47 – Prensa do tipo single action.....</i>	<i>76</i>
<i>Fig. 4.48 – Submenus de setup (Caso 3).....</i>	<i>77</i>
<i>Fig. 4.49 – Ferramenta preparada para simulação (vista lateral) (Caso 3).....</i>	<i>77</i>
<i>Fig. 4.50 – Ferramenta preparada para simulação em perspectiva 3D (Caso 3).....</i>	<i>78</i>
<i>Fig. 4.51 – O solver LS-DYNA a realizar o cálculo da simulação</i>	<i>78</i>
<i>Fig. 4.52 – 8 Frames da simulação à Formability Simulation da peça F (0,80 mm).....</i>	<i>79</i>
<i>Fig. 4.53 – Frame final da simulação à Formability Simulation da peça F (0,80 mm)</i>	<i>79</i>
<i>Fig. 4.54 – Fotografia da operação OP. 20 da peça F (0,80 mm)</i>	<i>79</i>
<i>Fig. 4.55 - Frame final da simulação à Formability Simulation da peça F (0,90 mm).....</i>	<i>80</i>
<i>Fig. 4.56 - Fotografia da operação OP. 20 da peça F (0,90 mm).....</i>	<i>80</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 2.1 - Relação entre as funcionalidades e o tipo de trabalho a ser realizado</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 2.2 - Análise das funcionalidades do software Autoform</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 2.3 - Análise das funcionalidades do software Dynaform</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 2.4 - Análise das funcionalidades do software Pam-Stamp 2G.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 2.5 - Análise das funcionalidades do software FormingSuite</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 2.6 - Análise das funcionalidades dos software Logopress3 e 3D Quickform.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 2.7 - Análise às funcionalidades dos software.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 2.8 - Desempenho dos software para diferentes situações</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4.1 – Sequência proposta para fabrico da peça</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 4.2 - Tempo total de desenvolvimento da banda da peça D através do Logopress3</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 4.3 - Relatório sumário da banda em formato Excel (Logopress3)</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 4.4 - Características do computador usado no caso 2</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 4.5 – Sequência de fabrico da peça F</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 4.6 - Características do computador usado no caso 3</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 4.7 – Estimativa de custo dos ensaios físicos (Caso 3)</i>	<i>81</i>

1 Introdução

1.1 Motivação

Numa altura em que o Mundo passa por uma grave crise económica, qualquer desafio para tentar tornar uma empresa mais competitiva e eficaz é bem-vindo. No decurso da realização da presente dissertação houve a possibilidade de trabalhar directamente com uma empresa, a APAL – Cunhos e Cortantes, Lda., que concebe, projecta e produz ferramentas de estampagem.

Fazendo esta empresa parte da indústria de estampagem, uma das muito afectadas pela crise, muito devido ao facto de estar fortemente ligada à indústria automóvel, fez com que este trabalho se tornasse um desafio ainda maior e mais aliciante.

*“Um pessimista vê a dificuldade em cada oportunidade;
um optimista vê a oportunidade em cada dificuldade”*

Sir Winston Churchill

Tendo como inspiração as palavras de Sir Winston Churchill, e considerando-se o autor desta dissertação um optimista, foi encarada esta fase difícil como a oportunidade ideal para contribuir da melhor maneira possível, tornando a APAL cada vez mais competitiva.

1.2 A Indústria de Estampagem

1.2.1 Considerações Gerais

De maneira a entender o produto, ter-se-á que perceber a indústria em que se encontra, saber qual a sua utilidade, habituais métodos de trabalhos, perceber a sua dimensão, entre outros aspectos.

Não há qualquer dúvida que a estampagem mudou drasticamente as nossas vidas. São às dezenas os produtos que utilizamos diariamente que contêm pelo menos uma peça obtida

por estampagem. Produtos de cozinha como a máquina de lavar loiça, a máquina de lavar roupa, tachos e panelas, lavatórios, todos eles contêm peças obtidas por estampagem metálica. Um estudo indica que nos anos 80 do século XX poderiam ser encontradas em média cerca de 100 000 peças estampadas em cada casa americana [1]. Mas provavelmente o produto utilizado pelos cidadãos que mais peças tem obtidas por estampagem será o automóvel, onde um número significativo de peças é obtido por este meio. Aliás, a indústria automóvel é sem dúvida a grande impulsionadora da indústria de estampagem.

As grandes empresas de componentes para as indústrias de automóveis, de aviação, e de electrodomésticos, frequentemente necessitam de ferramentas de estampagem. Estas empresas são chamadas de OEM (*Original Equipment Manufacturer*).

Algumas OEMs têm a capacidade não só de fabricar as ferramentas, como também de produzir os próprios componentes (peça única ou conjunto de peças), contudo, é normal subcontratarem outras empresas para a produção de peças. Estas empresas exteriores que trabalham directamente com as OEMs são chamadas fornecedores de primeira linha.

Na indústria de estampagem, um fornecedor de primeira linha geralmente possui uma série de prensas de estampagem e espera conseguir um contrato para fornecer peças para uma OEM. A partir do momento que obtém o contrato para fornecimento das peças, tem que construir a ferramenta que irá ser colocada na prensa de forma a produzir as peças [2]. A empresa pode ter um departamento para a produção de ferramentas, mas muitas têm que subcontratar empresas especializadas na concepção e produção de ferramentas de estampagem, as quais passam a ser fornecedores de segunda linha.

Esta dissertação foi idealizada e realizada a pensar nestas empresas de segunda linha, na procura de uma nova metodologia de trabalho, que seja capaz de tornar estas empresas mais competitivas, capazes de responder da melhor maneira às exigências do mercado.

Com o objectivo de fazer uma abordagem realista, o trabalho de dissertação foi objectivamente incidente num caso concreto de uma empresa, tendo, portanto, em consideração a realidade da actividade de projecto na empresa e de como estas poderão evoluir com base em conceitos novos e ferramentas informáticas (*software*) disponíveis no mercado.

1.2.2 O Sector das Ferramentas de Estampagem

O sector das ferramentas de estampagem tem sentido desde sempre grandes flutuações na procura, com ciclos de altos e baixos a durarem diversos anos. Estando fortemente ligado à indústria automóvel, estes ciclos são algo a que as empresas estão já habituadas, tendo já aprendido a expandirem-se ou contraírem-se ao longo do tempo [3].

Estes ciclos estão normalmente relacionados com o aparecimento de novos veículos. No entanto, a actual crise económica mundial, da qual a indústria automóvel é uma das principais afectadas, fez com que muitos programas para novos veículos tenham ficado em espera até que esta seja ultrapassada. As pessoas e as empresas deixaram de ver como prioritária a troca de veículo ou renovação da frota, o que naturalmente fez cair o número de venda de veículos de forma drástica.

Mas a indústria também não pode parar, e é mais do que nunca necessário arranjar formas de reduzir os custos e o tempo dispendido, de maneira a estimular os clientes a voltarem a comprar carros.

As empresas OEM vão querer pagar menos pelas peças produzidas pelos fornecedores de 1ª linha; estes por sua vez hão-de querer pagar menos pela ferramenta de estampagem.

O que acontece hoje em dia em diversos casos, é que as empresas de projecto e de produção de ferramentas de estampagem estão a aceitar fazer ferramentas com lucro zero, ou mesmo com ligeiros prejuízos, apenas para se tentarem manter activas durante esta fase bastante complicada. Isto acontece também devido à concorrência existente, por parte dos “Países Low-Cost” (PLCs).

Nos últimos anos tem-se verificado um aumento do número de ferramentas provenientes de “Países Low-Cost”. Dentro do lote de PLCs fazem parte China, Índia, Coreia, Tailândia, países da Europa de Leste, México, e outros países da América Central e do Sul. Poder-se-á considerar, também, que Portugal nas últimas décadas do século XX seria um PLC.

Os PLCs são conhecidos por serem mais baratos, por recorrerem a mão-de-obra barata, não pagarem benefícios sociais, terem fracas condições de saúde e segurança, e por vezes níveis de engenharia e de materiais inferiores.

No entanto, muitas vezes olhando numa perspectiva do ciclo de vida da ferramenta, as provenientes destes países não são as mais baratas.

Neste momento um grande número das ferramentas pequenas e simples são fabricadas em PLCs, uma vez que têm exigências funcionais menores, e como tal o risco para as empresas que encomendam a ferramenta torna-se menor, podendo levar a significativas poupanças [4].

Segundo a bibliografia [4], as características de ferramentas simples e complexas são, de acordo com os fabricantes, entendidas como:

Ferramentas simples:

- Pequenas
- Nível de engenharia baixo
- Peças planas
- Dobras de 90°
- Tolerâncias grandes
- Detalhes mínimos

Ferramentas complexas:

- Grandes
- Nível de engenharia elevado
- Formas 3D
- Grandes embutidos
- Tolerâncias apertadas
- Muitos detalhes e complexos
- Uso de materiais de resistência elevada



Fig. 1.1 – Exemplos de peças simples



Fig. 1.2 – Exemplos de peças complexas

É importante que as empresas dos países industrializados consigam baixar o preço das suas ferramentas, uma vez que os PLCs estão a evoluir na qualidade das suas ferramentas e podem a qualquer momento tomar também o controlo do fabrico das ferramentas complexas.

Segundo um estudo feito pelo CAR (*Center for Automotive Research*), o factor mais importante para os compradores de ferramentas é o preço [4]. Na Fig. 1.3 pode-se ver os resultados completos do estudo. A azul encontra-se os factores indicados como os mais importantes para os compradores e a roxo os factores indicados como importantes.

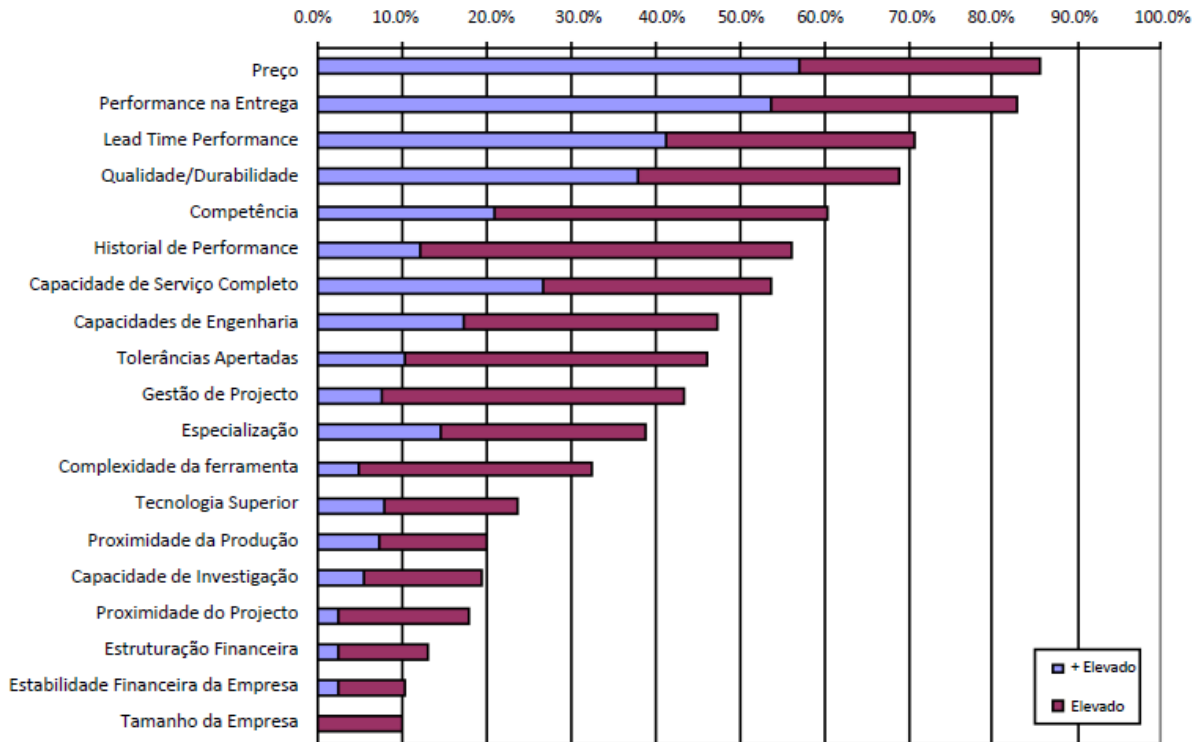


Fig. 1.3 – Principais factores que os fornecedores indicam como de maior importância para os seus clientes [4]

Visto isto, verifica-se que é necessário baixar o custo de fabrico da ferramenta, sem afectar a qualidade da mesma. Para isso é preciso mudar. É preciso um esforço maior que o normal, especialmente na fase de concepção. No planeamento do projecto têm de ser aplicados maiores esforços preditivos antes da fase de produção.

O facto de na maioria dos casos o projecto da peça estar separado do projecto da ferramenta, faz com que em grande parte das empresas apenas graças à experiência dos projectistas e do pessoal de oficina, assim como de um procedimento de tentativa - erro, seja possível fabricar as ferramentas com a qualidade aceitável. Hoje em dia, através de diferentes metodologias de trabalho, e de *software* de desenho e de engenharia, é possível que o projecto da ferramenta evolua de um processo essencialmente empírico para um processo baseado, também, em conhecimentos científicos e em cálculos de engenharia, que permita tomar decisões atempadas, encurtando o período de desenvolvimento por via da simulação.

*“Eu não posso mudar a direcção do vento.
Mas posso ajustar as minhas velas”*

Anónimo

1.3 Objectivos da Dissertação

Pretende-se com esta dissertação analisar o potencial da utilização de *software* CAD/CAE no fabrico de ferramentas de estampagem, com aplicação a casos concretos. De forma a tirar o máximo partido do uso dos *software*, serão desenvolvidas metodologias de trabalho específicas para uma aplicação correcta dos mesmos no contexto de uma dada empresa e, portanto, tendo em consideração a relação custo-benefício dessa aplicação.

Este trabalho foi realizado com o apoio da empresa APAL - Cunhos e Cortantes, Lda., sendo estas novas metodologias de trabalho pensadas de forma a melhorar ainda mais a eficiência de trabalho desta empresa, e está inserido num trabalho mais vasto que tem vindo a ser desenvolvido (ver Fig. 1.4). Os resultados e conclusões que se venham a tirar servirão de apoio para qualquer empresa deste sector, tendo depois de ser ajustadas à realidade de cada uma. Isto com base no pressuposto de que os conceitos podem ser generalizados, mas as aplicações devem ser dedicadas.

Na Fig. 1.5 pode observar-se de uma maneira simplificada as diferentes fases de fabrico de uma ferramenta de estampagem. Embora as grandes mudanças aconteçam na fase de concepção, também as fases de produção e de ensaios da ferramenta acabam por sofrer alterações.

Através da introdução de *software* CAE (*Computer Aided Engineering*), pretende-se simular o comportamento da peça, podendo assim detectar possíveis falhas e resolvê-las na fase de concepção. Isto irá permitir reduzir o número de rectificações a fazer na ferramenta durante a fase de produção, assim como reduzir o número de ensaios a realizar. Pretende-se trazer para a fase inicial do desenvolvimento conhecimento de fases posteriores uma vez que é aí que as alterações são mais eficientes (ver Fig. 1.6). O uso de *software* CAD (*Computer Aided Design*) específicos para a indústria de estampagem tem como principal intuito acelerar o processo de desenho da banda e da ferramenta.

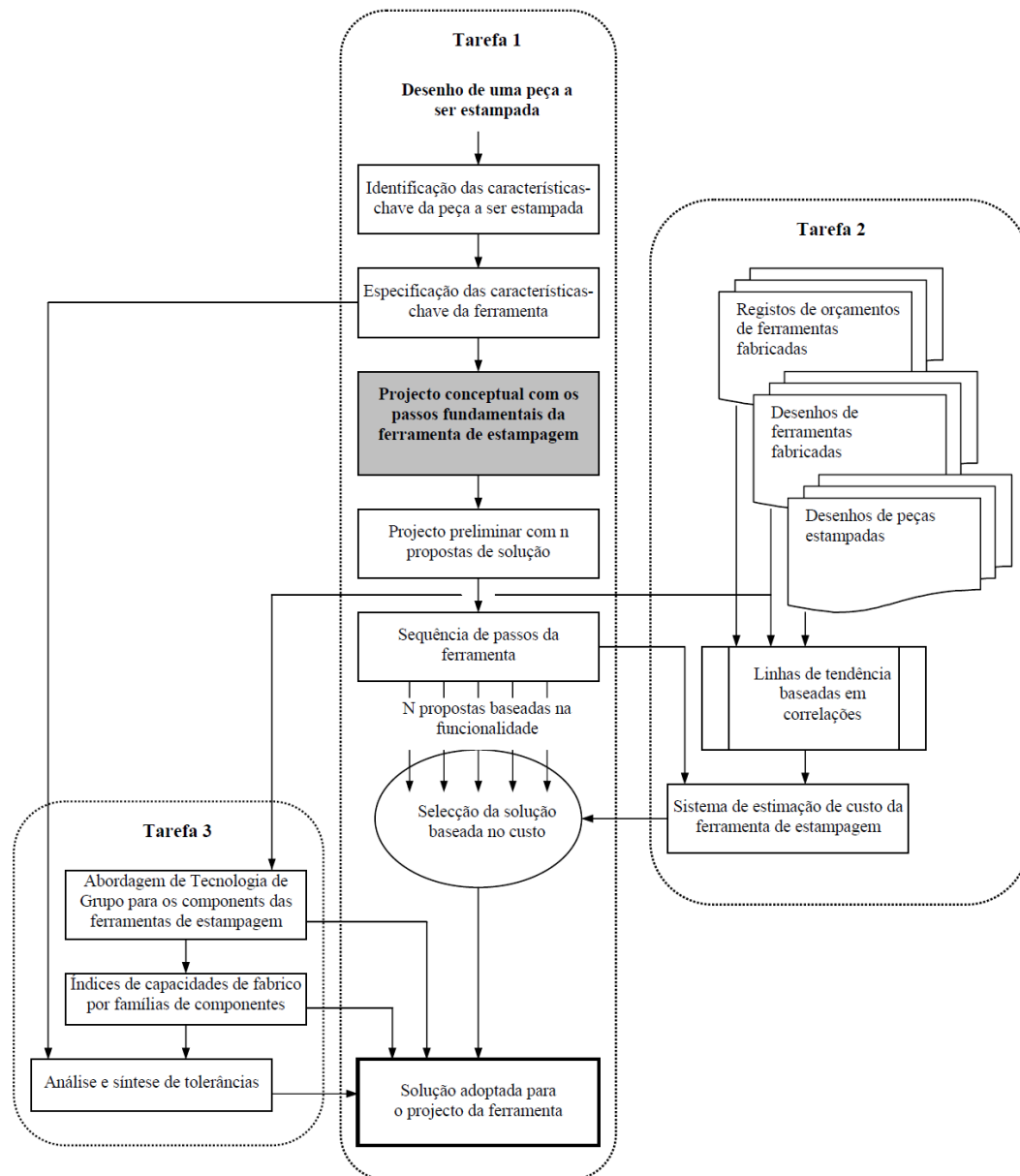


Fig. 1.4 – Enquadramento da dissertação (a cinzento) num trabalho alargado sobre projecto de ferramentas de estampagem

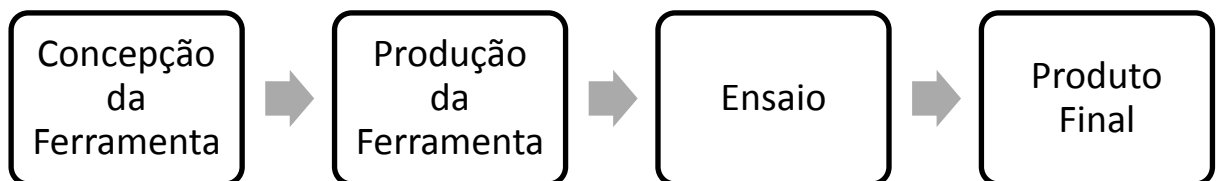


Fig. 1.5 – Esquema simplificado do processo de fabrico de uma ferramenta de estampagem

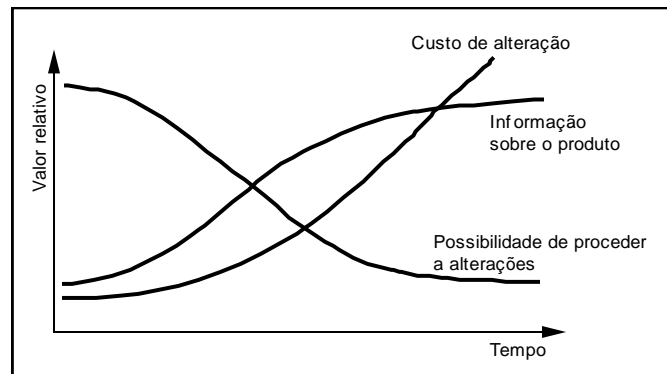


Fig. 1.6 – Informação versus custo de alterações durante o desenvolvimento do produto [5]

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos: Introdução, Análise dos Principais *Software* Comerciais, Metodologias de Trabalho: Correntes na Empresa e Propostas, Casos de Estudo e Conclusões.

A “Introdução” apresenta as motivações e objectivos para a execução desta dissertação, assim como um panorama geral da indústria de estampagem e do sector das ferramentas de estampagem. No capítulo “Análise dos Principais *Software* Comerciais” pretende-se apresentar a evolução dos *software* de simulação de estampagem, as capacidades actuais de cada *software*, e a comparação entre eles, e o meio a que cada um se destina. No capítulo “Metodologias de Trabalho: Correntes na Empresa e Propostas”, é inicialmente dado a conhecer a metodologia de trabalho actualmente aplicada na APAL Cunhos e Cortantes, Lda., seguindo-se a apresentação das metodologias de trabalho propostas na aplicação dos diferentes tipos de *software*. O capítulo “Casos de Estudo” tem como objectivo pôr à prova alguns dos *software* apresentados, através da sua utilização em casos reais da empresa. Por fim no capítulo das “Conclusões” são apresentadas as ilações mais importantes do trabalho realizado e perspectivas de futuros desenvolvimentos.

2 Análise dos Principais *Software* Comerciais

2.1 Enquadramento

A competição global existente hoje em dia na indústria obriga ao aumento do uso de técnicas de CAE, incluindo simulação numérica e modelação, de modo a baixar os custos e aumentar a velocidade dos processos de projecto. A aplicação de vários métodos/técnicas de CAE tem-se tornado um assunto da maior relevância na indústria automóvel [6].

Através da aplicação de diversas técnicas CAE é hoje possível abranger praticamente todo o ciclo de desenvolvimento do produto, desde da fase conceptual, passando pelo processo de planeamento, até à fase de produção. Na indústria de estampagem, as técnicas CAE são cada vez mais utilizadas, por exemplo, para prever a maior ou menor capacidade de enformação das peças, para determinar o tipo e as sequências do processo de fabrico e os respectivos parâmetros no desenho da ferramenta, etc.

A importância da aplicação de ferramentas CAE tem-se tornado cada vez maior à medida que as peças se tornam cada vez mais complexas. Este aumento de complexidade é justificado por diversos factores.

Do ponto de vista estético, com os sofisticados *software* de CAD os *designers* podem explorar toda a sua criatividade.

A nível ambiental, é necessário reduzir o peso dos carros e melhorar a sua aerodinâmica de forma a cumprir com as novas legislações ambientais, que obriga a indústria automóvel a reduzir significativamente a quantidade de gases poluentes emitidos pelos automóveis. Tendo em conta, que o conjunto de componentes conformados em chapa representa cerca de 30% do peso total de um automóvel [7], pode-se perceber o quão importante é a redução do peso nestes componentes, seja para tornar o carro mais leve, ou para permitir a introdução de outros extras no automóvel sem que isto obrigue a um aumento do seu peso. Esta redução do peso é conseguida através da utilização de novos materiais, como ligas de aço e de alumínio de resistência elevada, difíceis de enformar, aumentando naturalmente a complexidade de fabrico.

Por razões de qualidade, de fiabilidade e de conforto, tem-se procedido à integração de diferentes funções numa única peça. O facto de se estar a reduzir o número de componentes na montagem tem levado ao aumento da complexidade da forma dos componentes.

Como já foi referido anteriormente, o fabrico das ferramentas de estampagem até aqui dependia muito da experiência de determinadas pessoas do projecto e do fabrico da ferramenta. O aparecimento de novos materiais e de geometrias complexas, com comportamentos diferentes, faz com que essa experiência se manifeste de forma menos relevante no desenvolvimento da ferramenta.

Para se ter uma noção da influência dos custos da estampagem na indústria automóvel, cerca de 20% do custo total de um carro novo, são devidos à incorporação de componentes conformados em chapa [7].

Uma das ferramentas CAE com maior importância na estampagem é a simulação do comportamento mecânico do material durante o processo. Ao longo dos últimos anos, a sua aplicação tem tido um grande impacto nas fases de desenho do produto, desenvolvimento da ferramenta, construção da ferramenta e respectivo ensaio (*tryout*).

Na Fig. 2.1 apresenta-se um esquema do processo de fabrico sem utilização da simulação. Este baseia-se num método de tentativa-erro para validação da ferramenta. Com os apertados prazos de fabrico actuais, este método manifesta-se pouco competitivo.

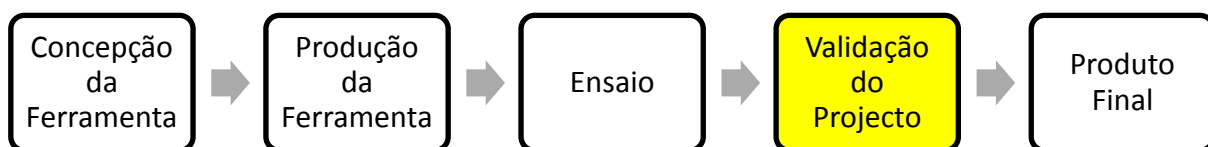


Fig. 2.1 - Processo de fabrico de uma ferramenta (versão sem simulação)

A desvantagem da estratégia tradicional é que a ferramenta não é validada antes de ser fabricada. Se a ferramenta não se comporta correctamente – peças estampadas fora de especificação –, é necessário desmontá-la e proceder a alterações. Qualquer uma destas operações envolve bastante tempo e dinheiro, e torna mais difícil ir ao encontro dos prazos de entrega.

A solução para todos estes problemas passa por trazer a validação do projecto para uma fase anterior à produção da ferramenta, e isso é possível graças à simulação (ver Fig. 2.2).

Nem sempre com a simulação é possível obter um produto correcto à primeira, no entanto, o número de ensaios necessários será certamente menor.

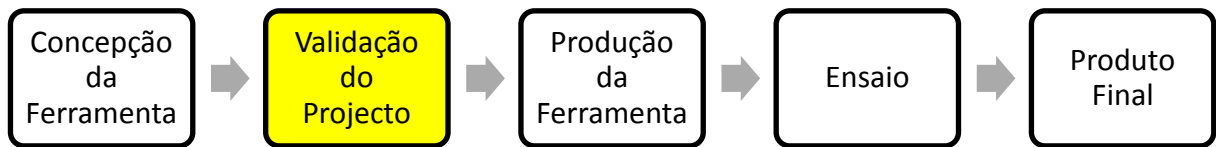


Fig. 2.2 - Processo de fabrico de uma ferramenta (versão com simulação)

Os principais objectivos industriais relativamente à utilização da simulação numérica dos processos de enformação de chapa podem ser sintetizados em três grandes grupos [7]:

1. Redução do tempo:
 - a. Verificação atempada da capacidade e da facilidade de fabrico;
 - b. Redução dos tempos de desenvolvimento;
 - c. Redução do número de iterações de tentativa-erro;
 - d. Resposta rápida a possíveis alterações.
2. Redução do custo
 - a. Produtos mais baratos;
 - b. Redução do custo das ferramentas;
 - c. Redução das dimensões das prensas;
 - d. Aumento da fiabilidade da ferramenta.
3. Aumento da qualidade dos produtos:
 - a. Melhor selecção dos materiais;
 - b. Produção de peças cada vez mais complexas;
 - c. Acumulação de experiência na estampagem com novos materiais;
 - d. Melhoria do funcionamento da ferramenta.

Nos últimos anos, as aplicações para a simulação de estampagem cresceram significativamente. Isto deve-se, em muito, à rápida evolução dos *software*, juntamente com computadores cada vez mais rápidos e baratos, permitindo assim que a simulação se torne eficiente a nível de custos e de tempos.

2.2 Evolução dos *Software*

No final dos anos 70 do século XX, diversos pioneiros, sobretudo dos principais fabricantes de automóveis, estudavam a possibilidade de utilizar os emergentes métodos de elementos finitos para analisar problemas relacionados com enformação de chapa. As principais questões relacionavam-se com as grandes falhas, ou seja o rasgar e enrugar da chapa [7] e [8].

A simulação era inicialmente vista como uma ferramenta para resolver problemas existentes na produção, e talvez ainda não seja industrialmente aceite como um método de teste da ferramenta antes da respectiva fase de produção.

As afirmações iniciais do potencial da simulação eram provavelmente exageradas. As indicações de poupança de tempo e de precisão eram em alguns casos abusivas, levando ao desapontamento de alguns utilizadores. A realidade é que a simulação irá em princípio adicionar tempo ao programa de desenvolvimento. As poupanças de tempo e dinheiro resultam do facto de evitar os problemas mais tarde, que pode levar ao não cumprimento do planeamento

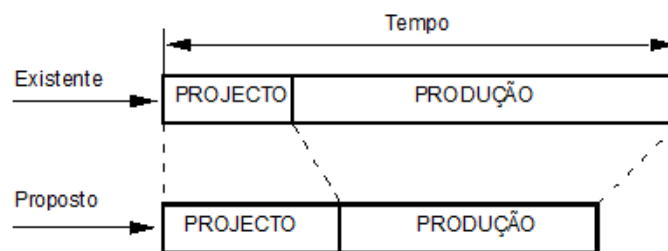


Fig. 2.3 - Investir no projecto para reduzir o custo e o tempo de lançamento do produto (adaptado de [9]).

Em 1995 foi levado a cabo um projecto para demonstrar o uso de uma combinação de métodos de simulação de maneira a resolver um problema de enformação [10]. Essa combinação de métodos foi usada para analisar e propor modificações para uma determinada ferramenta que já tinha passado por cinco fases de ensaios nos últimos doze meses. A simulação demorou cerca de seis semanas, mas a ferramenta modificada acabou depois por funcionar à primeira. Hoje em dia, é expectável que tal exercício se realize em menos de uma semana. É actualmente aceite que o enrugar e o rasgar da chapa possa ser previsto com pelo menos 90% de confiança [10]. Visto isto, seria de prever que ninguém procedesse ao fabrico de uma ferramenta complexa e dispendiosa, sem antes fazer a verificação através da simulação.

Os desafios principais actuais relacionam-se com o comportamento de alguns dos novos materiais, como a compensação da recuperação elástica (*springback*). No entanto, na última década têm-se verificado progressos significativos nestas áreas.

2.3 Funcionalidades Existentes nos *Software*

Neste subcapítulo pretende-se dar a conhecer as principais funcionalidades existentes nos *software* dedicados à estampagem. Algumas destas funcionalidades são mais dedicadas à simulação do comportamento mecânico dos materiais, enquanto outras são mais indicadas para o desenho.

2.3.1 Planificação (*Blank*)

O módulo de planificação (*blank*) é uma ferramenta crucial em todas as fases do ciclo de desenvolvimento de produto, desde a fase de concepção do produto até à fase de produção final da ferramenta, ajudando a reduzir os custos derivados com o desperdício de material.

Este módulo providencia os seguintes benefícios:

- Uma análise precoce dos custos durante o desenvolvimento do produto - é possível determinar o contorno da planificação em segundos, apenas necessitando como input a peça em formato CAD;
- Durante a fase de projecto da ferramenta é possível minimizar o material a usar.

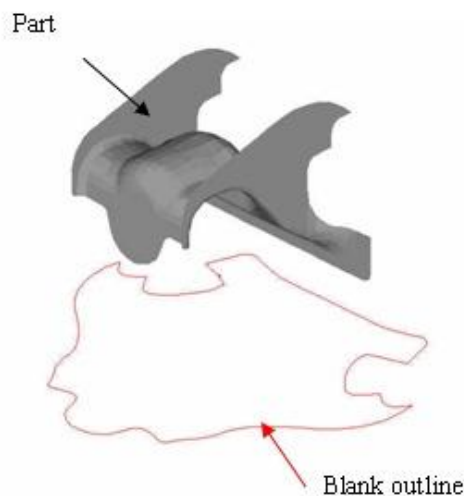


Fig. 2.4 – Exemplo do contorno da planificação de uma peça [11]

2.3.2 Distribuição das Peças Planificadas (*Nesting*)

A distribuição das peças planificadas na chapa (*nesting*) tem como finalidade minimizar a quantidade de material. É um dos factores mais importantes para reduzir o custo de uma peça estampada, uma vez que o custo do material pode representar 80% do custo total da peça.

O módulo *Nest* é especializado para determinar a melhor distribuição (*layout*) de peças na chapa - em chapa ou em *coil* (rolo de chapa) - , tornando-o ideal para a realização de orçamentos. Este módulo permite também uma redução drástica do risco relacionado com cálculos imprecisos do custo do material, reduzindo a variação entre o custo estimado e o custo real de 25% para 1~2% [12].

Alguns *software* permitem calcular automaticamente o melhor *layout*, tendo em conta a variação dos custos de diferentes larguras de chapa. Isto é uma característica muito importante, uma vez que a largura de chapa pode fazer variar os custos de material até 25% [13].

Os principais benefícios deste módulo são:

- Minimização dos custos de material
- Minimização da quantidade de material necessário
- Capacidade de processamento mais rápido do que com cálculos manuais

Na Fig. 2.5 pode observar-se os tipos de informação diferentes contidos num relatório final de *Nesting*. Em cima encontra-se a informação definida pelo utilizador, ao centro está ilustrado o *layout* da banda, e no fundo do relatório estão apresentados os resultados, onde se destaca a largura da banda, o passo e a percentagem de material utilizado.

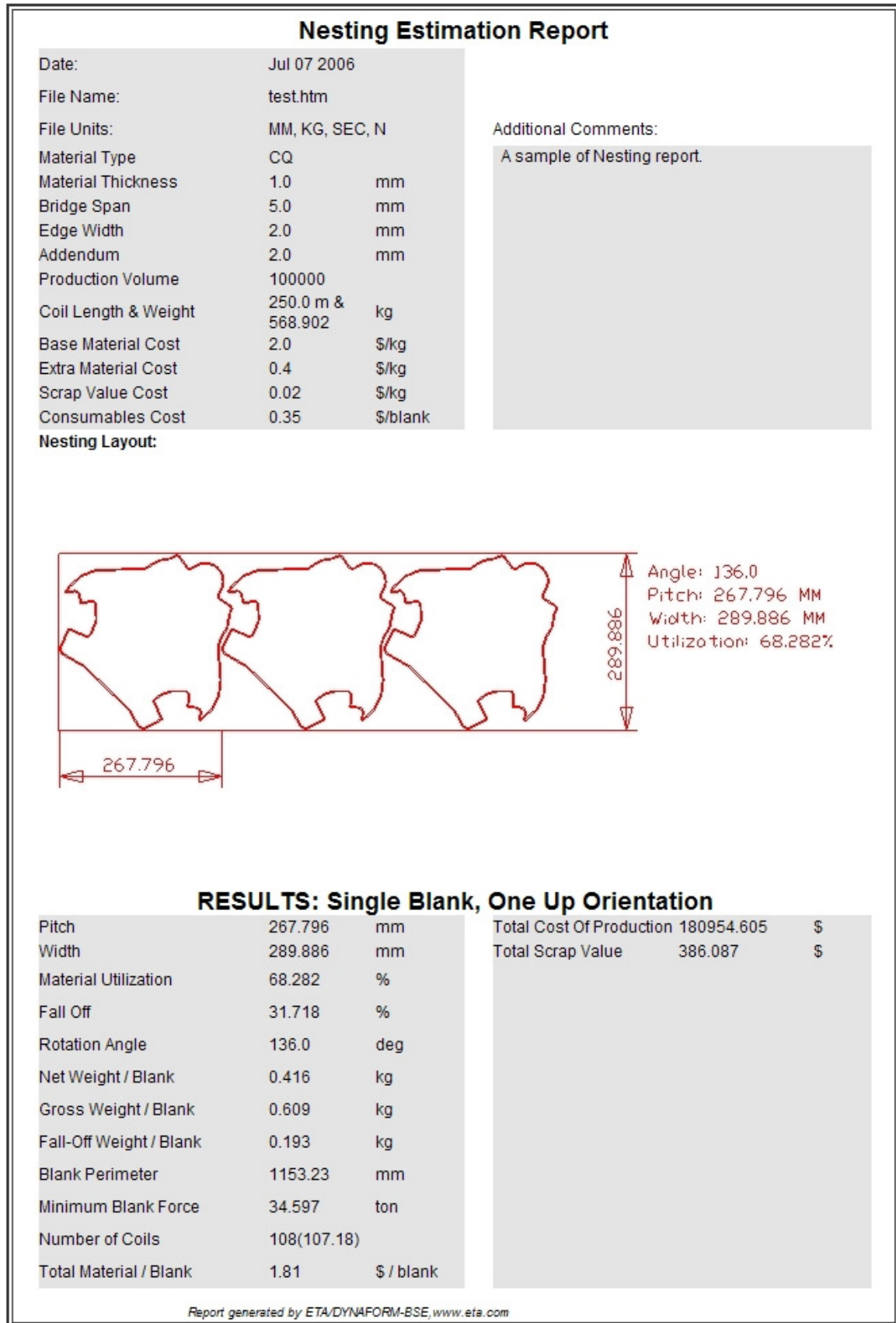


Fig. 2.5 – Exemplo de um relatório final de *nesting* [11]

2.3.3 Simulação da Capacidade de Enformação (*Formability Simulation*)

A simulação da capacidade de enformação (*Formability Simulation*) é um módulo de importância extrema ao longo do ciclo de desenvolvimento do produto, desde a análise inicial à formabilidade do produto, até à ajuda na tomada das decisões correctas na concepção da ferramenta.

O ideal seria conseguir uma ferramenta a funcionar sem necessidade de alteração/afinação, indo ao encontro do paradigma “*Right first time*”, substituindo o ensaio físico por um ensaio virtual. Isto significa ser capaz de detectar os problemas normais em estampagem, tais como a separação de chapa (*splitting*), áreas de espessura reduzida (*thinning*) e o enrugamento da chapa (*wrinkling*).

Como se pode observar na Fig. 2.6, os resultados da análise são apresentados sob a forma de áreas coloridas na superfície da peça, onde cada cor tem um significado específico, ou através de diagramas de limite de enformação (FLD - *Forming Limit Diagram*).

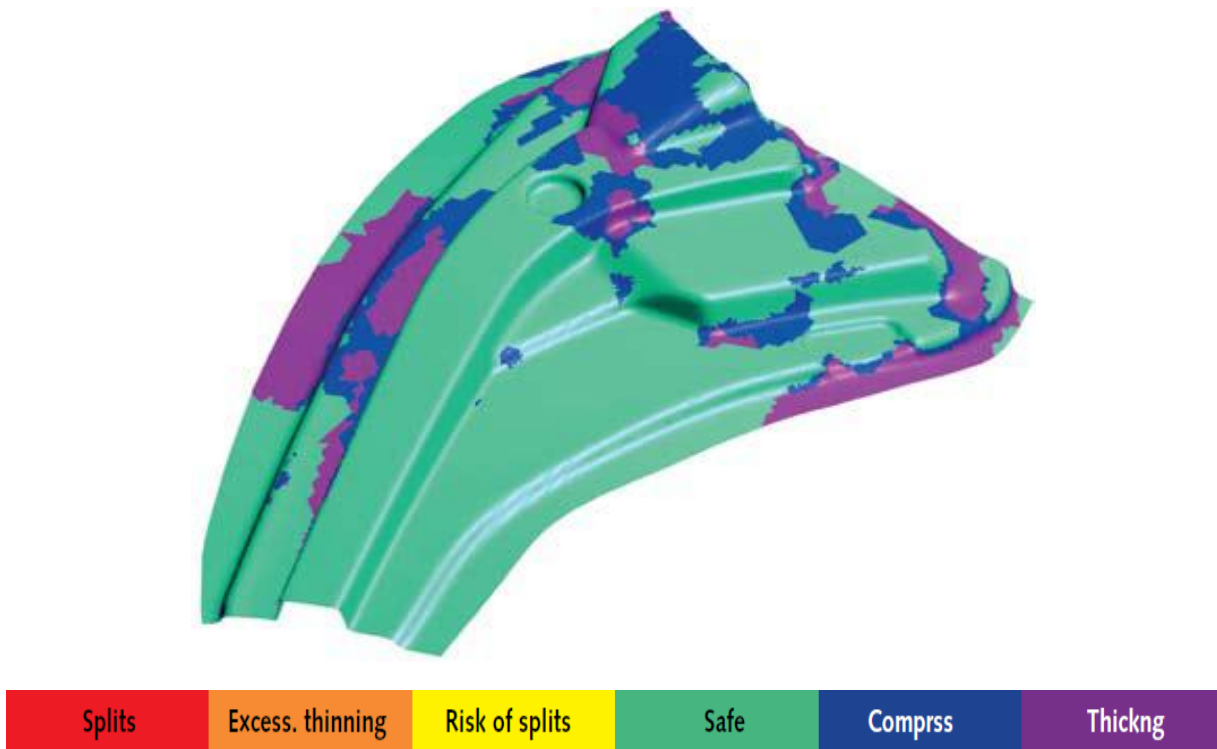


Fig. 2.6 – Análise da capacidade de enformação de uma peça em Autoform [14]

Os códigos de cor têm o seguinte significado:

- *Splits* – Áreas de fractura. Estas áreas estão acima da FLC (Forming Limit Curve) do material especificado.
- *Excessive Thinning* – Nesta área, a redução da espessura é superior ao valor aceitável (o valor base para o aço é de 30%).
- *Risk of splits* – Estas áreas podem vir a fracturar. Por defeito, encontra-se entre a FLC e 20% abaixo da FLC.
- *Safe* – Todas as áreas que não têm problemas de enformação.
- *Compression* – Áreas onde poderão aparecer rugas. Nestas áreas o material tem tensões de compressão mas não tem deformações de compressão significativas.
- *Thickening* – Áreas onde se podem esperar rugas, dependendo da geometria da curvatura, espessura e contacto da ferramenta. O material nestas áreas tem deformações de compressão, o que implica o aumento da espessura da peça localmente durante o processo de enformação.

O FLD é um mapa do estado de extensão de um modelo (ver Fig. 2.7). As extensões de cada nó são representadas nos eixos de maior e menor extensão. A posição de cada ponto da FLD pode ser usada para determinar o modo de enformação da peça numa determinada área.

Normalmente, o FLD é usado para encontrar a geometria mais adequada para as ferramentas de estampagem.

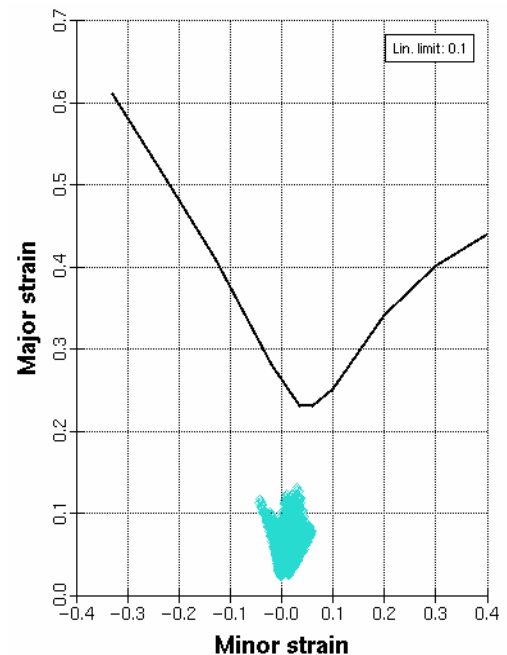


Fig. 2.7 – Exemplo de um gráfico FLD [15]

O *wrinkling* é um dos defeitos maiores na estampagem, especialmente para aquelas peças exteriores onde a aparência final é crítica. Para além disso, pode danificar as ferramentas e vir a afectar a peça na montagem e no seu funcionamento. A previsão e prevenção do *wrinkling* são por isso de importância elevada.

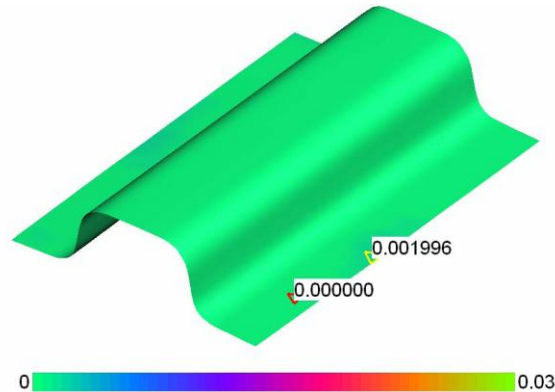


Fig. 2.8 – Exemplo de análise de resultados *wrinkling* [15]

Outro problema que pode ocorrer na enformação é a variação de espessura da chapa (*thickness*) (ver Fig. 2.9). Este problema pode afectar a resistência mecânica da peça.

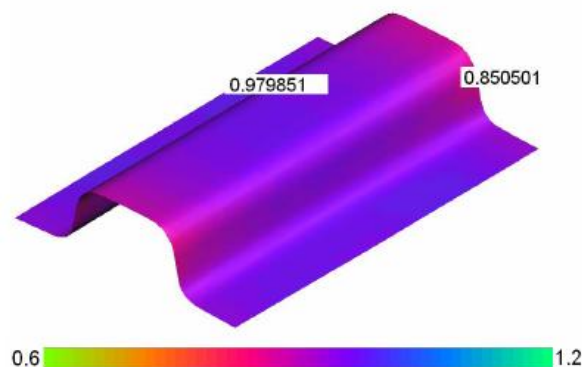


Fig. 2.9 – Exemplo de análise de resultados *thickness* [15]

2.3.4 Análise da Recuperação Elástica (*Springback Analysis*)

De todos os problemas técnicos que atormentam os engenheiros na estampagem, a recuperação elástica (*springback*) é sem dúvida um dos principais. Seja a estampar pequenos componentes de precisão, componentes estruturais, ou grandes painéis de automóveis, é necessário colocar o *springback* no topo da lista das preocupações.

O *springback* pode ser definido como uma condição que ocorre quando uma chapa metálica é trabalhada a frio. Após a libertação da força de enformação, a peça tem tendência a regressar parcialmente à sua forma original devido à recuperação elástica do material. Como consequência altera a forma final da peça, fazendo com que deixe de coincidir com a ferramenta. O *springback* é influenciado não só pelo limite elástico do material, mas também pela espessura, raio da dobra e ângulo da dobra.

Na Fig. 2.10 apresenta-se um exemplo de uma análise ao *springback* de um componente automóvel. Através de áreas coloridas visualiza-se o deslocamento dos pontos da peça em relação à posição nominal.

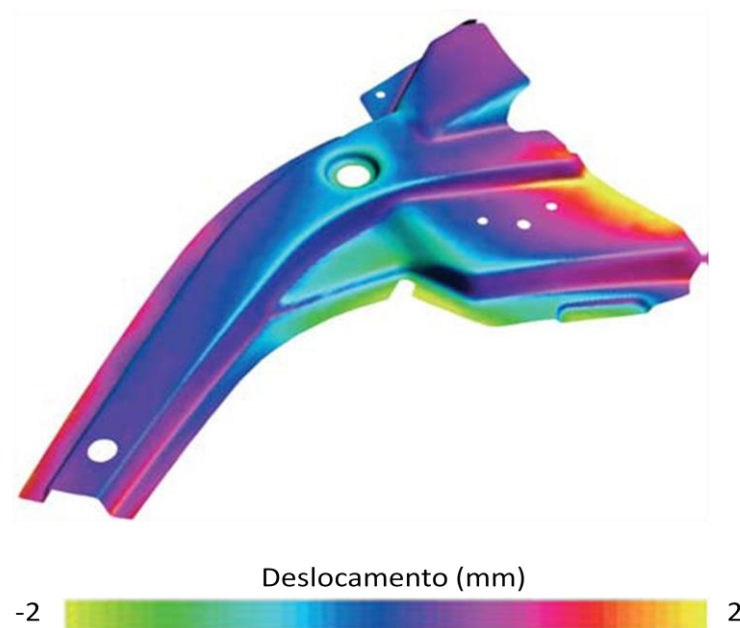


Fig. 2.10 – Análise ao *springback* de uma peça [14]

Para compensar os efeitos do *springback*, a ferramenta tem que ser modificada, o que causa um aumento dos custos e do tempo dispendido. De maneira a evitar estes trabalhos extraordinários, a simulação do *springback* tem ganho cada vez mais importância, especialmente com o actual aumento do uso de ligas de aço e de alumínio de alta resistência.

Alguns *software* para além de estimarem o *springback* da peça (Fig. 2.10), possuem também a capacidade de estimar a compensação necessária a dar à ferramenta para poder compensar esse efeito, através do módulo SCP (*Springback Compensation Process*).

Na Fig. 2.11 encontra-se um exemplo onde foi aplicado o módulo SCP. A geometria compensada da ferramenta é usada como input para a simulação seguinte. Depois de vários ciclos de compensação, é possível fazer com que o efeito do *springback* não colida com as

tolerâncias especificadas. A diferença da geometria da peça (vermelho) para a geometria de referência (verde) antes da compensação do *springback* (esquerda) e após a compensação (direita) é evidente na Fig. 2.11.



Fig. 2.11 – Aplicação do *springback compensation* num componente estrutural [14]

O módulo SCP permite também ao utilizador extrair as superfícies compensadas de forma a serem depois usadas no desenho da ferramenta. Tal capacidade reduz significativamente o tempo gasto pelos projectistas em refazer as superfícies compensadas [8].

2.3.5 Projecto da Matriz (*Die Designer*)

Com o intuito de dar apoio numa fase inicial da concepção da ferramenta, o módulo *Die Designer* tem a capacidade de, a partir do modelo CAD da peça, gerar rapidamente as superfícies da ferramenta, incluindo o *addendum* (área estampada, mas que não faz parte da peça) e o *binder* (ver Fig. 2.12), para todo o processo de estampagem.

Como resultado, é assim possível gerar diversas propostas para a ferramenta num único dia, ao invés de desenhar apenas algumas faces individuais com um sistema CAD. Estes conceitos diferentes serão depois analisados em termos da capacidade de enformação, formando o ciclo ilustrado na Fig. 2.12.

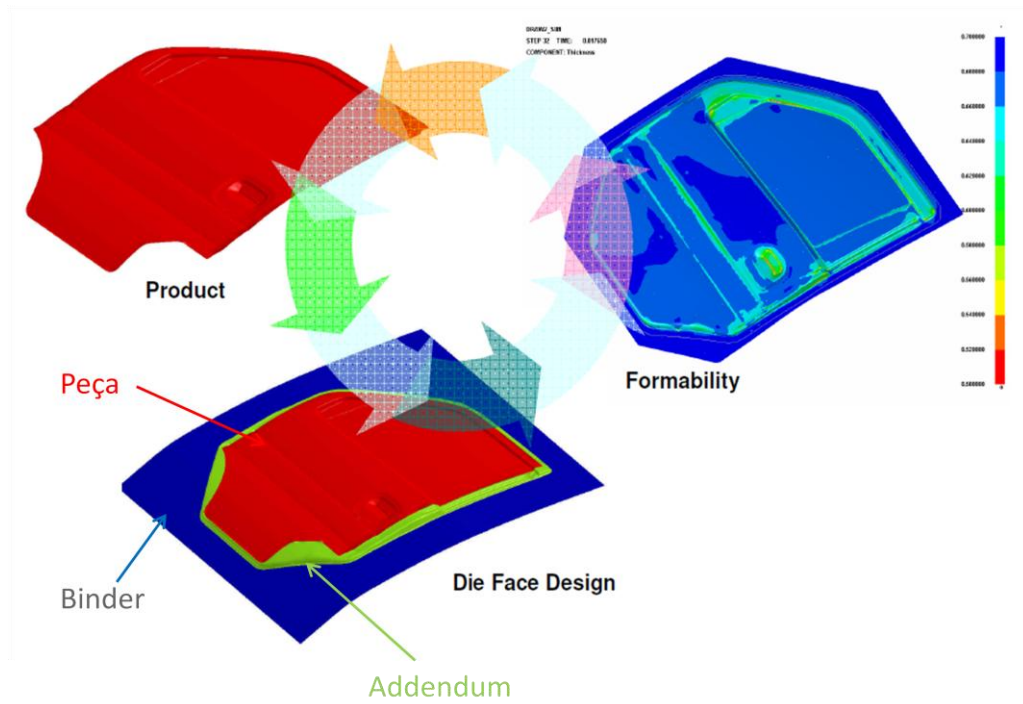


Fig. 2.12 – Ciclo de uma avaliação rápida do painel exterior de uma porta, com indicação da localização do *addendum* e do *binder* (Dynaform) [8]

2.3.6 Análise da Ferramenta (*Die System Analysis*)

A análise da ferramenta (*Die System Analysis*) é um módulo capaz de analisar diferentes operações da ferramenta, incluindo a remoção dos desperdícios de corte (*Scrap Shedding & Removal*) e a integridade estrutural da ferramenta (*Die Structural Integrity*).

A causa principal para a paragem da produção de uma linha de estampagem é a má remoção dos desperdícios. Esta aplicação oferece aos projectistas a possibilidade de examinar o desempenho da ferramenta de corte antes da sua construção (ver Fig. 2.13). É possível analisar durante ou depois da concepção da ferramenta como é que os desperdícios vão cair da ferramenta, mover-se pelos canais, e sair pelas aberturas [16].

Se a ferramenta de corte não passar na validação virtual, será necessário fazer alterações no projecto e repetir a simulação. Este ciclo repete-se até não haver mais problemas, ou então, pode também ser utilizado na procura da melhor solução.



Fig. 2.13 – Análise da remoção dos desperdícios de corte (Dynaform) [17]

A integridade estrutural da ferramenta foi sempre uma das principais preocupações na estampagem, em termos da qualidade da peça, do peso, da duração da ferramenta, da segurança e do custo. Uma ferramenta com falta de integridade estrutural vai produzir peças de má qualidade devido à falta de rigidez da ferramenta durante a operação de estampagem.

Para além disso, qualquer quebra da ferramenta irá afectar a produção de toda uma linha de montagem. Isto pode resultar em perdas de milhões de euros para os fabricantes automóveis. A quebra da ferramenta pode ainda pôr em risco a segurança dos trabalhadores [8].

É por estas razões que é fundamental garantir a integridade estrutural de uma ferramenta.

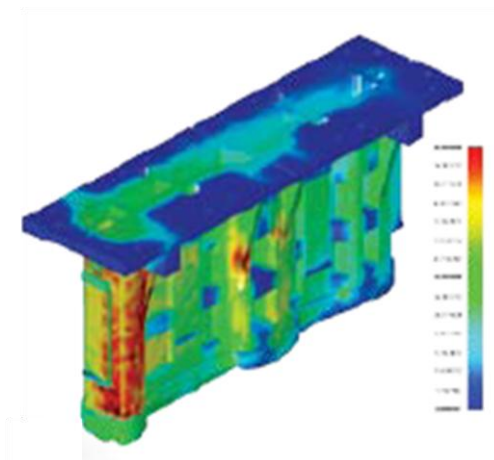


Fig. 2.14 – Análise à integridade estrutural de uma ferramenta (Dynaform) [17]

2.3.7 Planificação de Peças (*Flattening Part*)

Com o módulo *Flattening Part* é possível planificar a peça com apenas alguns *clicks*, no entanto, é necessária uma especial atenção na ordem da planificação que se utiliza. Para que o módulo seguinte, *Strip Creator*, esteja correcto, é necessário que a planificação seja feita pela ordem certa. Começa-se do fim da banda para o início e vai-se colocando *station marks* ao longo do processo, onde cada um destes representa um passo da banda. Na Fig. 2.15 e Fig. 2.16 pode observar-se a planificação de algumas peças.

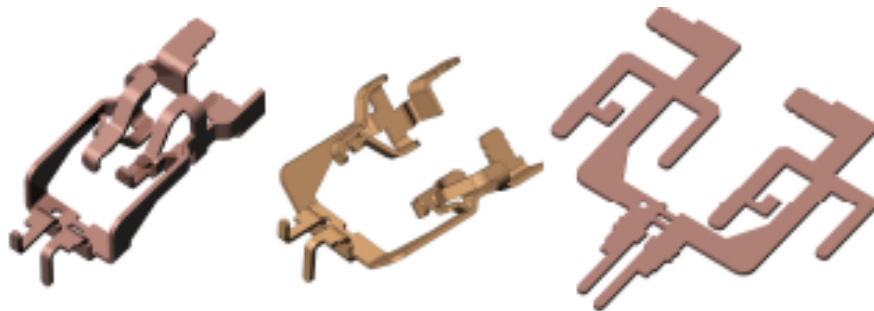


Fig. 2.15 - Exemplo de planificação de uma peça (Logopress3) [18]

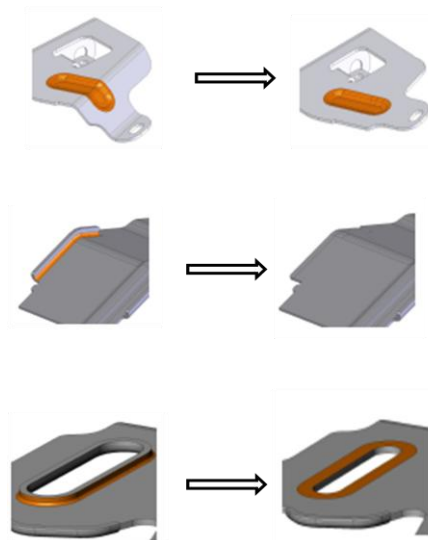


Fig. 2.16 – Diferentes passos de planificação (Logopress3) [18]

2.3.8 Criador de Banda (*Strip Creator*)

O módulo *Strip Creator* pode ser usado tanto para ferramentas progressivas como para ferramentas transfer. Como já foi dito anteriormente, para que este módulo possa ser realizado é necessário que o anterior tenha sido efectuado correctamente.

Na Fig. 2.17 pode observar-se um exemplo de uma banda, com todos os passos necessários para a criação da peça.

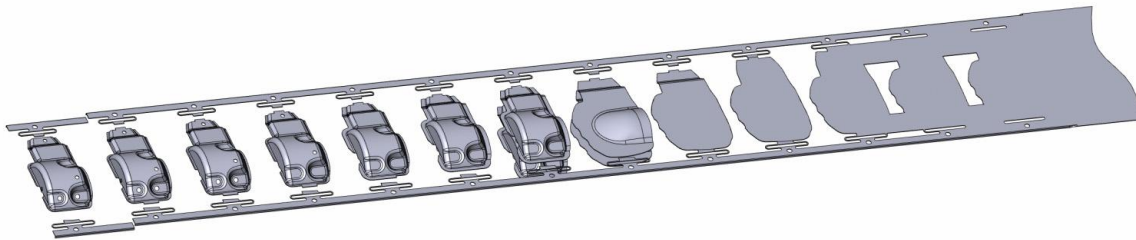


Fig. 2.17 – Exemplo de banda (Logopress3) [18]

Com vista ao passo seguinte, *Tool Creator*, é também neste módulo que se inicia a definição dos punções como pode ser visto na Fig. 2.18 a roxo.

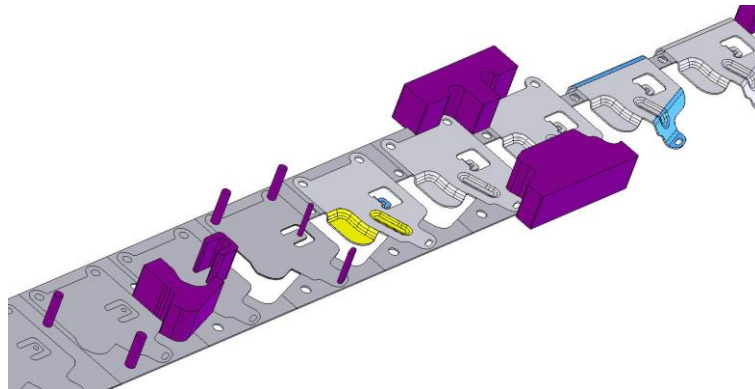


Fig. 2.18 – Criação dos punções sobre a banda (Logopress3) [18]

Funções-chave *Tool Creator*:

- Define a largura de passo e de banda ideal, de maneira a gastar o mínimo de material possível,
- Indica a força total, a força de corte e a força de dobra,
- Dá o número de estações,
- Calcula a percentagem de material desperdiçado,
- Calcula o perímetro dos punções de corte,
- Calcula o peso do material gasto por passo.

Existe também um módulo especial para a criação da banda para peças com simetria axial. É possível criar automaticamente a banda para determinado tipo de peças como indicado na Fig. 2.19.

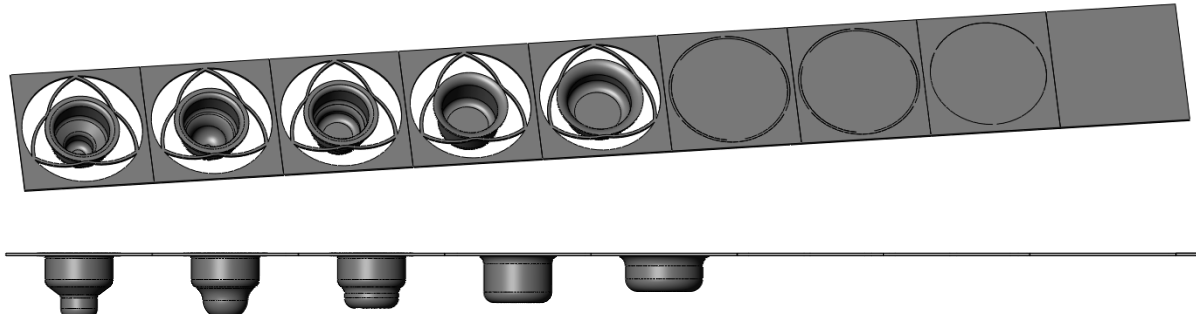


Fig. 2.19- Exemplo de banda para peças com simetria axial (Logopress3) [18]

2.3.9 Criador de Ferramenta (*Tool Creator*)

Para se realizar o módulo *Tool Creator* é necessário que os dois módulos anteriores (*Flattening Part* e *Strip Creator*) já tenham sido efectuados. Assim sendo, uma vez criada a banda resta apenas a última etapa, a criação da ferramenta. A pouco e pouco e com a ajuda de uma biblioteca de componentes *standard* (Fig. 2.20) é possível criar ferramentas como a que se pode observar na Fig. 2.21.

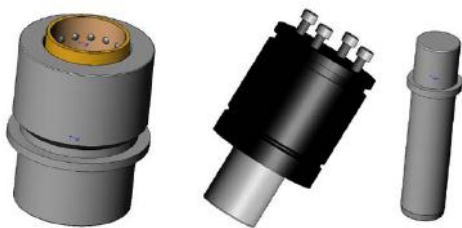


Fig. 2.20- Exemplos de componentes *standard* da biblioteca [18]

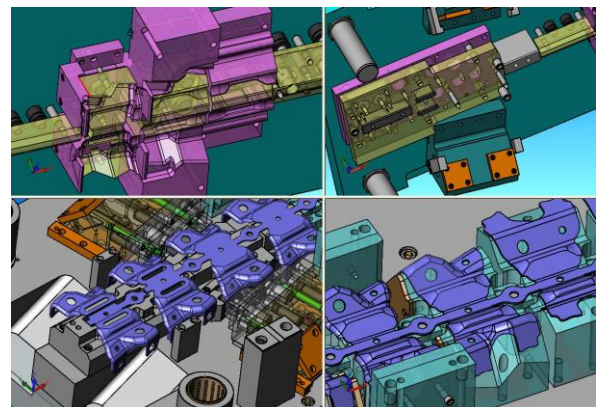


Fig. 2.21 – Criação de uma ferramenta (Logopress3) [18]

2.4 Comparação Funcional de *Software*

2.4.1 Introdução

Uma vez apresentadas as funcionalidades, pretende-se agora através deste subcapítulo ficar a conhecer os diferentes *software* existentes no mercado, assim como, as funcionalidades que possuem das anteriormente indicadas.

Comparam-se seis *software* existentes no mercado, os quais quase preenchem a totalidade da cota de mercado dos *software* dedicados à estampagem. Estes *software* não são todos concorrentes uns dos outros, podendo-se logo à partida fazer uma divisão, entre *software* autónomos (não dependem de outros *software* para trabalhar), e *software* não autónomos.

Dos *software* autónomos encontram-se no mercado os seguintes:

- AUTOFORM
- DYNAFORM
- PAM-STAMP 2G
- FORMINGSUITE

Dos *software* não autónomos encontram-se no mercado os seguintes:

- LOGOPRESS3
- 3D QUICKFORM

Dada a impossibilidade de testar todos os *software*, a análise comparativa que é apresentada de seguida, é feita com base em informação disponibilizada pelos fabricantes, assim como através de diversos artigos científicos publicados. Grande parte destes provêm de conferências internacionais de estampagem, como é o caso da Numisheet (<http://numisheet2008.ethz.ch/>, site variável consoante o ano da conferência), LS-DYNA Users Conference (<http://www.ls-dynaconferences.com/>), e ESAFORM (<http://esaform.insa-lyon.fr/>).

2.4.2 Análise Comparativa

Através desta análise pretende-se, essencialmente, ficar a conhecer quais as capacidades de cada *software*, e qual o tipo de aplicação a que cada um mais se adequa. A selecção correcta do *software* por parte das empresas é crucial, de forma a tirar o melhor partido deste. Os principais factores a ter em conta são:

- O tipo de peças que a empresa fabrica (simples, complexas, ou ambas)
- O tipo de ferramentas que a empresa fabrica (transfer, progressivas, ou ambas)
- A função para a qual o *software* servirá de apoio (desenho da peça, orçamentação, concepção e produção da ferramenta) (Ver Tabela 2.1)

Nas páginas que se seguem irão ser mostradas, através das tabelas 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7, as conclusões da análise feita a cada *software* e às funcionalidades que cada um possui.

Tabela 2.1 - Relação entre as funcionalidades e o tipo de trabalho a ser realizado

		TIPO DE TRABALHO		
		DESENHO DA PEÇA	ORÇAMENTAÇÃO	CONCEPÇÃO E PRODUÇÃO DA FERRAMENTA
FUNCIONALIDADES	<i>Blank</i>			
	<i>Nesting</i>			
	<i>Formability Simulation</i>			
	<i>Springback Analysis</i>			
	<i>Die Designer</i>			
	<i>Die System Analysis</i>			
	<i>Flattening Part</i>			
	<i>Strip Creator</i>			
	<i>Tool Creator</i>			

O Autoform é o *software* mais utilizado pelos construtores automóveis. Os vinte maiores construtores automóveis e a maioria dos seus fornecedores escolheram o Autoform como *software* de eleição, possuindo uma cota de mercado entre 50 a 60 % [19]. As funcionalidades disponibilizadas cobrem todo o ciclo de processos (ver Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Análise das funcionalidades do *software* Autoform

		AUTOFORM
FUNCIONALIDADES	Blank	Capaz de determinar o contorno exterior da peça planificada em segundos. Toma em consideração furos na peça e mostra uma tabela com custos do material.
	Nesting	Permite calcular automaticamente o melhor layout das peças, tomando em conta a variação dos custos de diferentes larguras de <i>coil</i> . Quatro tipos diferentes de layout (<i>1-up</i> , <i>2-up</i> , <i>1-up/1-down</i> , <i>2 shapes</i>). Poderoso e flexível <i>setup</i> , com possibilidade de definição da largura mínima e máxima do <i>coil</i> , e do peso máximo. Inclui tabela com os custos.
	Formability Simulation	O Autoform possui duas ferramentas distintas para analisar a formabilidade das peças. Primeiro, o Autoform – OneStep, que como o nome indica, analisa a peça num só passo. Esta é uma ferramenta ideal para a validação inicial da peça, assim como a realização inicial de estimativas de custos com o material e a ferramenta. Segundo, o Autoform – Incremental, que simula todos os passos do processo de enformação. Nos seus resultados estão incluídos todos os dados necessários para analisar e otimizar o processo (<i>splits</i> , <i>wrinkles</i> , <i>thickness</i> , distribuição da deformação, FLD, etc).
	Springback Analysis	Simula com precisão o <i>springback</i> da peça, e consegue em apenas alguns minutos prever a compensação desse <i>springback</i> , mesmo para grandes painéis. Com base no cálculo preciso do <i>springback</i> , modifica automaticamente as superfícies da peça e da ferramenta. O utilizador pode definir determinadas regiões para serem compensadas. A geometria compensada é automaticamente usada como input para uma validação rápida e precisa da ferramenta.
	Die Designer	Permite criar facilmente ferramentas simétricas. Os raios da peça podem ser alterados e os furos preenchidos. Existe flexibilidade no desenho do <i>binder</i> e o <i>addendum</i> é rapidamente gerado.

O Dynaform é um *software* bastante completo que abrange todo o ciclo de processos, e que se destaca dos outros através do módulo *Die System Analysis*. O Dynaform tem como *solver* o LS-DYNATM, considerado um dos mais poderosos na sua classe [20]. A diversidade de utilizações deste *solver* é enorme, onde a simulação de estampagem é já considerada como a sua segunda maior aplicação, apenas atrás da análise de ensaios de colisão [10]. Todos os anos existe uma conferência internacional (*LS-DYNA Users Conference*) onde são

apresentados e discutidos os últimos avanços na área. As funcionalidades deste estão apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Análise das funcionalidades do *software* Dynaform

		DYNAFORM
FUNCIONALIDADES	Blank	Gera automaticamente a superfície intermédia da peça, corrige e preenche falhas na superfície e furos. Prevê com precisão o <i>blank</i> a partir do 3D da peça.
	Nesting	Permite estudar o melhor <i>layout</i> para <i>1-up</i> , <i>2-up</i> , <i>2-pair</i> , <i>mirror</i> e <i>multi</i> . Obtenção de um relatório final com toda a informação necessária, incluindo o custo total da produção, custo por <i>blank</i> , etc. (Ver Fig. 2.5 – Exemplo de um relatório final de <i>nesting</i>)
	Formability Simulation	Suporta a simulação quer de ferramentas <i>transfer</i> como de ferramentas progressivas. Possui uma interface simples de usar e que requer pouco ou nenhum conhecimento de análise por elementos finitos (FEA - <i>Finite Element Analysis</i>). Determina as áreas de <i>splitting</i> , <i>thinning</i> , <i>potencial wrinkling</i> , etc. Inclui também a demonstração de um gráfico FLD.
	Springback Analysis	Capaz de realizar a análise ao <i>springback</i> da peça e através de um processo iterativo, obter a superfície da ferramenta compensada razoavelmente.
	Die Designer	Permite modificar rapidamente ângulos da geometria da peça. Termina geometrias incompletas da peça para a simulação. Gera automática ou manualmente o <i>binder</i> , baseado na geometria da peça. Tendo como base as dimensões, a profundidade e o material da peça é gerado o <i>addendum</i> .
	Die System Analysis	É possível analisar diferentes operações da ferramenta, incluindo a remoção dos desperdícios de corte (<i>Scrap Shedding & Removal</i>) e a integridade estrutural da ferramenta (<i>Die Structural Integrity</i>).

Como se pode observar na Tabela 2.4, o Pam-Stamp 2G é um *software* especialmente focado na simulação da peça e no ensaio virtual da mesma. A ausência de um módulo de *nesting* faz com que este *software* não seja ideal para a fase de orçamentação.

O *software* FormingSuite é desenvolvido pela FTI (*Forming Technologies Inc.*), uma empresa com 20 anos de experiência no ramo, e que possui uma carteira de clientes variada, entre fabricantes e fornecedores para as indústrias automóvel, espacial e electrónica. O FormingSuite pelas funcionalidades que disponibiliza é um *software* adequado para as fases de desenho da peça e orçamentação, mas pode também ser útil na fase de concepção e de projecto da ferramenta. As funcionalidades deste estão apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.4 - Análise das funcionalidades do *software* Pam-Stamp 2G

		PAM-STAMP 2G
FUNCIONALIDADES	Blank	Previsão rápida da forma do blank.
	Formability Simulation	Capaz de detectar todos os habituais erros na enformação, incluindo <i>splits</i> , <i>wrinkles</i> , etc. Através do seu módulo PAM-AUTOSTAMP é possível incluir pequenos detalhes no ensaio virtual, oferecendo resultados precisos e detalhados. Todas as variáveis do processo de ensaio: <i>drawbeads</i> (pinos individuais colocados ao longo da <i>blank</i> que permitem controlar o fluxo de material de regiões localizadas), <i>spacers</i> (espaçadores montados no pisa que permitem controlar o fluxo de material localmente), lubrificação e cilindros a gás (colocados no interior da ferramenta para permitir a aplicação local de uma força de pressão em áreas bem definidas da <i>blank</i>), podem ser facilmente incluídas no ensaio virtual, tal como o engenheiro faria na realidade para afinar e otimizar o processo.
	Springback Analysis	Prevê com fiabilidade o <i>springback</i> e permite validar a subsequente correcção.
	Die Designer	Através do módulo PAM-DIEMAKER o utilizador pode rapidamente construir a geometria da ferramenta, usando a peça como referência. O <i>addendum</i> e o <i>binder</i> são gerados intuitivamente.

Tabela 2.5 - Análise das funcionalidades do *software* FormingSuite

		FORMINGSUITE
FUNCIONALIDADES	Blank	Precisão elevada do <i>blank</i> (imprecisão de 1,4%, tendo em conta a deformação do material). Base de materiais vasta, com possibilidade de incluir outros.
	Nesting	Possui um <i>setup</i> flexível, com possibilidade de introduzir constrangimentos no passo, na largura de banda, e no ângulo da <i>blank</i> , de forma a adequar-se ao equipamento disponível e requisitos do produto. Produz layouts totalmente otimizados para <i>1-up</i> , <i>2-up</i> , <i>mirror</i> e <i>multi</i> . Calcula o custo do material considerando a espessura e a largura do <i>coil</i> .
	Formability Simulation	Identifica em minutos 90% dos problemas de formabilidade da peça. O resultado da simulação inclui zonas seguras, zonas de deformação, FLD, <i>splitting</i> , <i>thinning</i> , <i>wrinkling</i> , <i>thickning</i> , tensão e deformação.
	Springback Analysis	Determina a forma final da peça resultante do <i>springback</i> .

Embora o Logopress3 e 3D Quickform sejam dois *software* desenvolvidos por empresas diferentes, as suas semelhanças são muitas, não se justificando fazer uma descrição separada destes *software*. Como indicado antes, estes são dois não autónomos, necessitando do *software* de CAD SolidWorks para funcionar. Ao contrário dos outros indicados que são essencialmente *software* CAE com algumas capacidades de CAD, estes são essencialmente *software* de CAD com algumas capacidades de CAE, ou seja, a sua função principal é a de desenvolver o desenho da ferramenta e não a simulação. Por esta razão existe um *software* de desenho 3D como o SolidWorks de base, funcionando estes dois como aplicações especializadas no desenho da ferramenta. Ambos recebem do SolidWorks a distinção *Certified Gold Product*. As funcionalidades destes estão apresentadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Análise das funcionalidades dos *software* Logopress3 e 3D Quickform

		LOGOPRESS 3 / 3D QUICKFORM
FUNCIONALIDADES	<i>Blank</i>	Permite ao utilizador obter rapidamente a <i>blank</i> teórica, a partir de peças importadas ou desenhadas directamente no SolidWorks.
	<i>Nesting</i>	Optimização do <i>nest</i> , com indicação da percentagem de material usado.
	<i>Formability Simulation</i>	Informa de forma simples, sobre o <i>thinning</i> e <i>thickening</i> da peça, assim como da tensão e deformação da mesma.
	<i>Flattening Part</i>	É possível planificar a peça, desdobrando passo a passo a peça e eliminando furos e alguns embutidos. A planificação é limitada a peças simples.
	<i>Strip Creator</i>	Permite definir o <i>layout</i> da banda com eficiência, assim como, desenhar os punções de corte e de dobra. Realiza todas as funções-chave indicadas no capítulo 2.3.8.
	<i>Tool Creator</i>	Capaz de acelerar e otimizar a fase de desenho da ferramenta, através de comandos especializados para a assistência na construção da ferramenta, e de uma biblioteca de componentes standard que possui, à qual se podem adicionar novos componentes.

2.4.3 Conclusões

Pretende-se com estas conclusões estabelecer um caminho a seguir por parte das empresas na escolha correcta do *software*. Esse caminho será traçado com base nas avaliações que serão aqui apresentadas. Na Tabela 2.7 estão os resultados da análise feita às funcionalidades dos *software*.

Tabela 2.7 - Análise às funcionalidades dos *software*

		SOFTWARE AUTÓNOMOS				SOFTWARE NÃO AUTÓNOMOS	
		AUTOFORM	DYNAFORM	PAM-STAMP 2G	FORMINGSUITE	LOGOPRESS 3	3D QUICKFORM
FUNCIONALIDADES	<i>Blank</i>	Muito Bom	Muito Bom	Bom +	Muito Bom	Bom	Bom
	<i>Nesting</i>	Muito Bom	Muito Bom		Muito Bom	Bom	Bom
	<i>Formability Simulation</i>	Muito Bom	Muito Bom -	Muito Bom -	Bom	Razoável	Razoável
	<i>Springback Analysis</i>	Muito Bom	Muito Bom -	Bom +	Razoável		
	<i>Die Designer</i>	Bom	Bom	Bom			
	<i>Die System Analysis</i>		Bom				
	<i>Flattening Part</i>					Razoável	Razoável
	<i>Strip Creator</i>					Bom	Bom
	<i>Tool Creator</i>					Razoável	Razoável

Tendo em conta a relação entre as funcionalidades e os tipos de trabalho a serem desempenhados (Tabela 2.1), e os resultados da análise feita às funcionalidades dos *software* (Tabela 2.7), chega-se aos resultados apresentados na Tabela 2.8. Nesta pode ver-se o desempenho de cada *software* consoante o tipo de ferramenta, o tipo de peça e o tipo de utilização.

Tabela 2.8 - Desempenho dos *software* para diferentes situações

		SOFTWARE AUTÓNOMOS				SOFTWARE NÃO AUTÓNOMOS	
		AUTOFORM	DYNAFORM	PAM-STAMP 2G	FORMINGSUITE	LOGOPRESS 3	3D QUICKFORM
TIPO DE FERRAMENTA	Transfer	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom -	Bom	Bom -	Bom -
	Progressiva	Muito Bom	Muito Bom -	Bom +	Bom	Bom	Bom
TIPO DE PEÇA	Simples	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom -	Bom	Bom
	Complexas	Muito Bom	Muito Bom -	Bom +	Bom		
TIPO DE UTILIZAÇÃO	Desenho da peça	Muito Bom	Muito Bom -	Muito Bom -	Muito Bom -	Bom +	Bom +
	Orçamentação	Muito Bom	Muito Bom		Muito Bom	Bom	Bom
	Concepção e produção da ferramenta	Muito Bom	Muito Bom -	Muito Bom -	Bom	Bom	Bom

Os *software* são vendidos na sua totalidade ou em módulos, permitindo assim ao utilizador escolher apenas os módulos que mais necessita, uma opção naturalmente mais barata. A partir do momento em que a empresa toma a decisão de qual ou quais as funcionalidades que necessita, deve escolher o *software* com base nos resultados apresentados na Tabela 2.7.

Um factor que pode ser importante na decisão - e que não é tido em conta nesta análise - é o preço, uma vez que as empresas de *software* apenas o divulgam se lhes for pedido um orçamento. Com tantos *software*, e funcionalidades aqui apresentados, o número de combinações possíveis era muito grande, tornando-se impossível apresentar preços. Deste modo, depois da escolha das funcionalidades e de analisado quais os *software* que melhor as desempenham, o preço poderá funcionar como factor de desempate ou factor limitador (Ver Fig. 2.22).

No caso de a empresa pretender um *software* completo para um determinado tipo de utilização, o processo de selecção pode ser um pouco diferente, onde teremos como referência os resultados apresentados na Tabela 2.8. Neste caso o tipo de ferramenta e o tipo de peça a fabricar também serão tidos em conta.

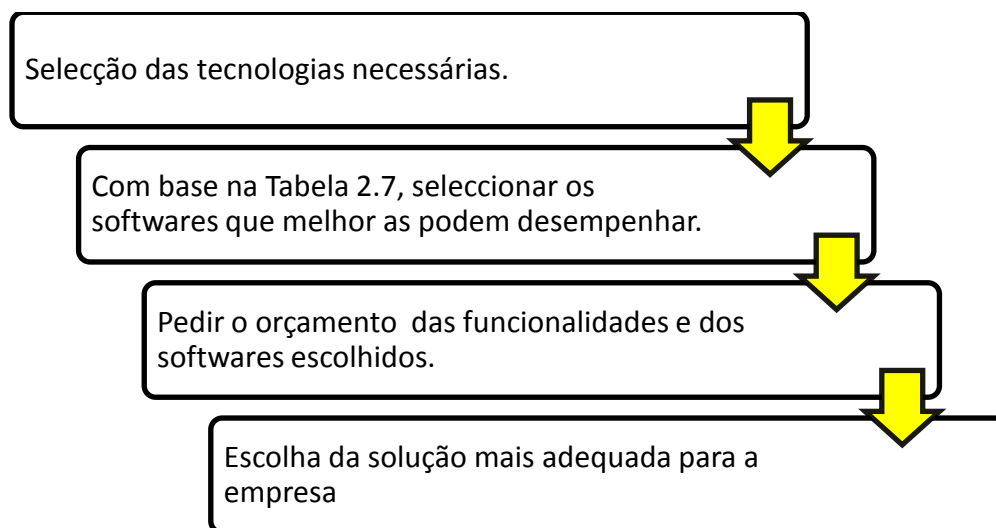


Fig. 2.22 - Processo de selecção do *software* (versão módulos)

Uma vez que esta dissertação é especialmente dirigida a uma empresa de projecto e de produção de ferramentas, será para esta utilização o foco deste trabalho, em detrimento de outras utilizações, nomeadamente, para o desenho da peça e para orçamentação.

Na Fig. 2.23 encontra-se um esquema para selecção do *software*, tendo como ponto de partida a selecção do tipo de ferramenta (transfer ou progressiva), seguindo-se a selecção do tipo de peça a fabricar (simples ou complexa) e por fim a selecção do *software*. Os *software* estão ordenados de cima para baixo, consoante a avaliação estipulada para o desempenho da função. A preto encontram-se os *software* de simulação CAE (Autoform, Dynaform, Pam-Stamp 2G, e FormingSuite) e a vermelho os *software* de desenho CAD (Logopress3, e 3D Quickform).

Mais uma vez é chamada a atenção para que no fim do processo inicial de selecção seja necessário pedir um orçamento, para depois com base nele fazer a selecção final do *software*.

Apesar dos *software* Logopress3 e 3D Quickform terem notas inferiores aos restantes *software*, se a função principal que se pretende for o desenho de ferramentas simples, estes poderão ser a escolha mais acertada.

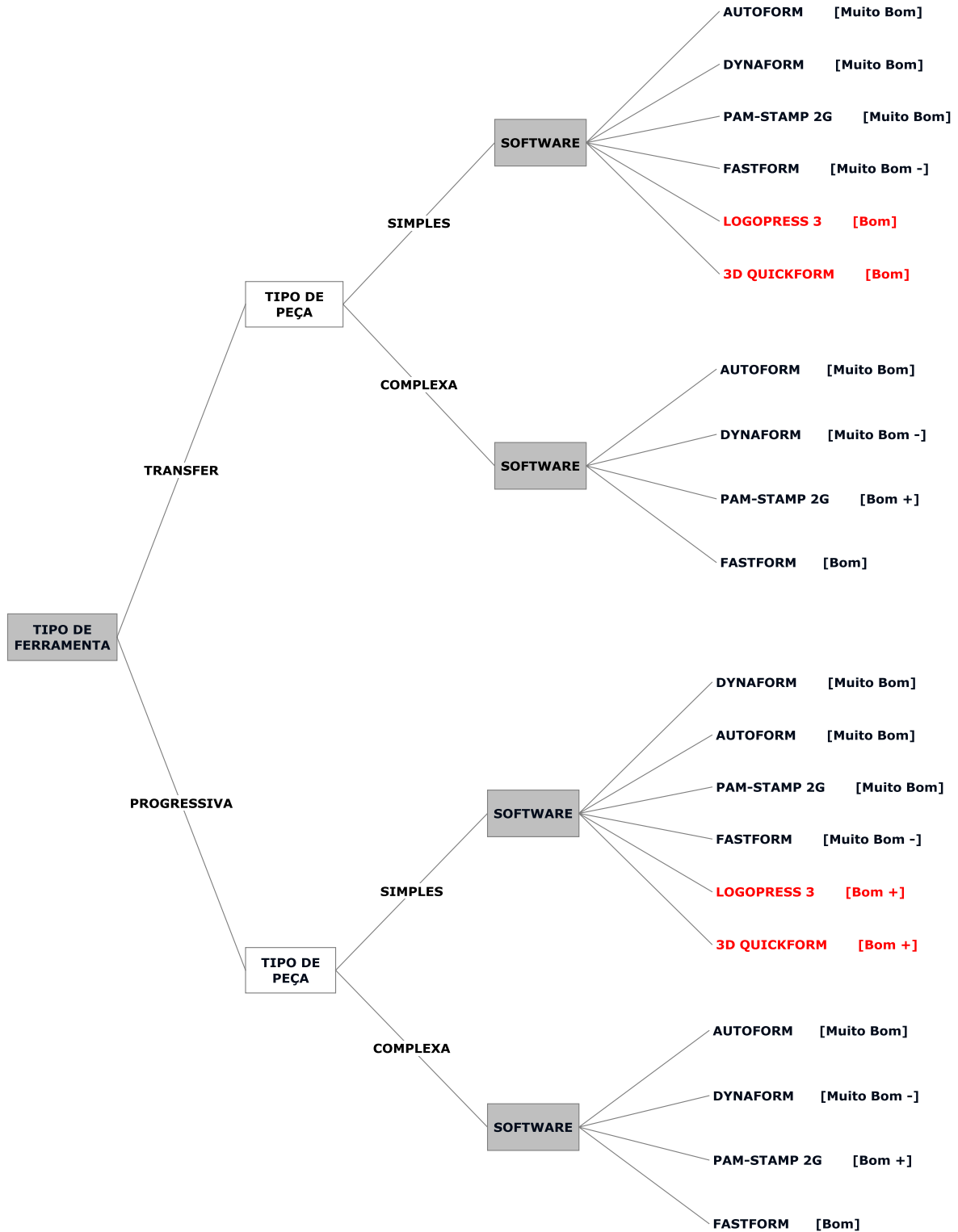


Fig. 2.23 – Esquema de selecção do *software* para a concepção de ferramentas de estampagem

3 Metodologias de Trabalho: Correntes na Empresa e Propostas

3.1 Metodologias Correntes na Empresa

3.1.1 Apresentação da Empresa

A APAL – Cunhos e Cortantes Lda. é uma empresa do sector metalomecânico de precisão fundada em 1989, que concebe, projecta e fabrica ferramentas para corte e estampagem de peças metálicas, destinadas às indústrias automóvel, eléctrica/electrónica e utilidades domésticas, na sua maioria para o mercado externo. A empresa tem uma área fabril de cerca de 2900 m², tem 50 funcionários qualificados e um parque de máquinas-ferramentas moderno. A empresa dispõe de prensas mecânicas de 250 a 600 toneladas para ensaios e produção de pequenas séries.

Dada a diversidade de indústrias para a qual a empresa trabalha, é natural que o tipo de peças também seja variado, produzindo tanto peças simples (ver Fig. 1.1) como peças complexas (ver Fig. 1.2).

3.1.2 Metodologia de Trabalho na Empresa

Para que se possa compreender bem esta empresa descreve-se todo o processo de concepção e produção de uma ferramenta, desde a entrada do pedido de orçamento até à expedição da ferramenta. Na Fig. 3.1 pode observar-se tanto o fluxo de material como o fluxo de informação. O fluxo de informação é toda a informação necessária para o projecto e fabrico de uma ferramenta de estampagem, desde os relatórios enviados ao cliente, até aos relatórios para a produção dos componentes da ferramenta.

O processo inicia-se a partir do momento em que o cliente se dirige à empresa com um pedido de orçamento, e que normalmente vem acompanhado pelo desenho 3D da peça, um desenho 2D com as tolerâncias da peça, um esquema simplificado da banda, o material da peça e as especificações da prensa. Com base nestes dados o departamento comercial define o preço da ferramenta que, caso seja aceite por parte do cliente, fará com que o departamento comercial envie toda a informação necessária para o departamento técnico de projecto, de modo a dar-se início à concepção da ferramenta.

Uma vez concluído o projecto, os desenhos e a folha de materiais são enviados para a preparação de trabalhos e aprovisionamento de materiais. Neste ponto será preparada toda a informação necessária para os fornecedores, coordenação fabril, programação, tratamento de materiais, montagem e controlo da qualidade.

A partir deste momento estão reunidas todas as condições para se dar início ao fabrico da ferramenta. A coordenação fabril encarregar-se-á de gerir todos os processos de maquinaria até ao momento da montagem da ferramenta.

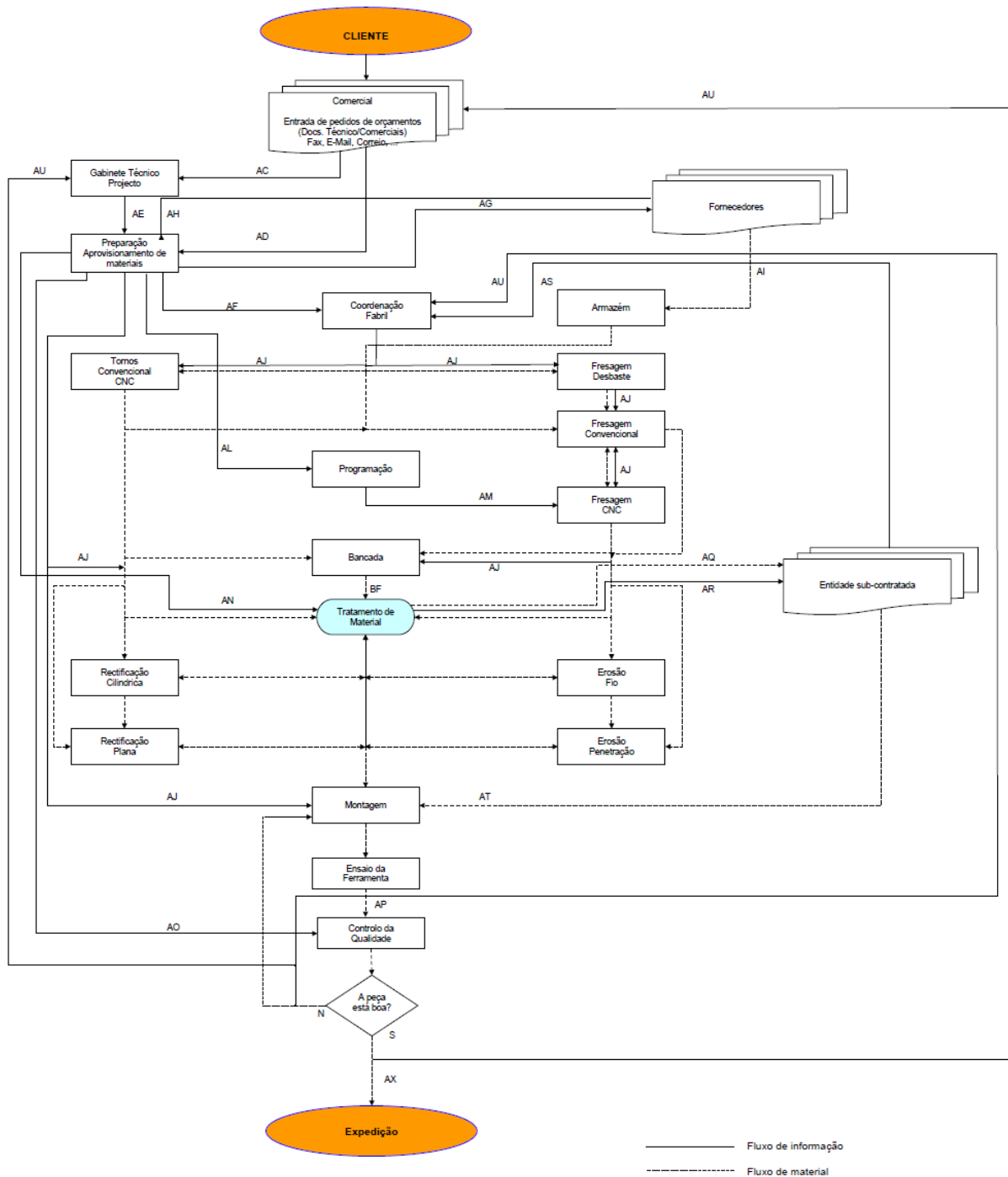
Com a ferramenta já montada é agora necessário realizar o ensaio da mesma. De início ensaia-se a ferramenta módulo a módulo, e no fim ensaia-se a ferramenta completa. As peças resultantes do ensaio são enviadas para o controlo da qualidade, onde através de uma máquina de medição por coordenadas, as dimensões da peça irão ser comparadas com as da lista de cotas da peça.

No caso de a peça não estar dentro dos valores de cotas pretendidos, ou seja, não estar boa, será necessário proceder a alterações na ferramenta. Para isso são enviados os relatórios do controlo da qualidade para o gabinete técnico de projecto e para a coordenação fabril, e a ferramenta de volta para a secção de montagem.

O gabinete técnico de projecto terá de encontrar soluções para resolver os problemas da peça. Estas alterações ao projecto irão naturalmente obrigar a fazer alterações/afinações na ferramenta, fazendo com que esta tenha que ser em parte desmontada para se proceder a trabalhos sobre alguns componentes da ferramenta.

Uma vez feitas as alterações, volta-se a montar a ferramenta para se proceder ao ensaio da mesma. A peça daí resultante seguirá novamente para o controlo da qualidade.

Se o relatório do controlo da qualidade for novamente negativo, o procedimento volta-se a repetir. No caso de a peça estar dentro dos valores de cotas pretendidos, ou seja, estar boa, o relatório do controlo da qualidade é enviado para a área comercial, que se encarregará de enviar para o cliente. Se o cliente aprovar o relatório, a ferramenta será expedida.



AA - Pedido de orçamentos e prazos de entrega possíveis; AB - Proposta do pedido de orçamento e prazos de entrega possíveis; AC - Características técnicas e prazo do projecto; AD - Prazo de entrega e orçamento estabelecido; AE - Projecto completo, desenhos e folha de materiais; AF - Desenhos, folha de materiais, folha de preparação e prazo de entrega; AG - Pedido de orçamentos para o material e produtos normalizados, folha de encomenda; AH - Recepção de folha de materiais para confirmação; AI - Recepção dos materiais pedidos e dos produtos normalizados; AJ - Desenhos e folha de preparação; AL - Lista de programas a efectuar para a fresagem CNC; AM - Programa para a fresagem CNC e folha de programação; AN - Lista de material para tratamento e respectivo tratamento; AO - Lista de cotação para verificação; AP - Peça estampada para verificação; AQ - Materiais para tratamento de superfície; AR - Lista de materiais e respectivos tratamentos para o tratamento de superfície; AS - Relatório do tratamento de superfície; AT - Material com tratamento de superfície; AU - Relatório do controlo de qualidade; AV - Reencaminhamento do controlo de qualidade; AX - Expedição da ferramenta após validação do cliente do relatório do controlo de qualidade.

Fig. 3.1 – Fluxograma de projecto e fabrico de uma ferramenta [21]

As alterações a realizar ao longo do processo de fabrico anteriormente apresentado, irão ser aplicadas na área do gabinete técnico de projecto. Como tal, presta-se particular atenção a esta área, de maneira a melhor compreender as diferenças para as metodologias apresentadas no subcapítulo 3.2. No fluxograma da Fig. 3.2 apresenta-se a actual sequência de trabalhos do gabinete técnico de projectos.

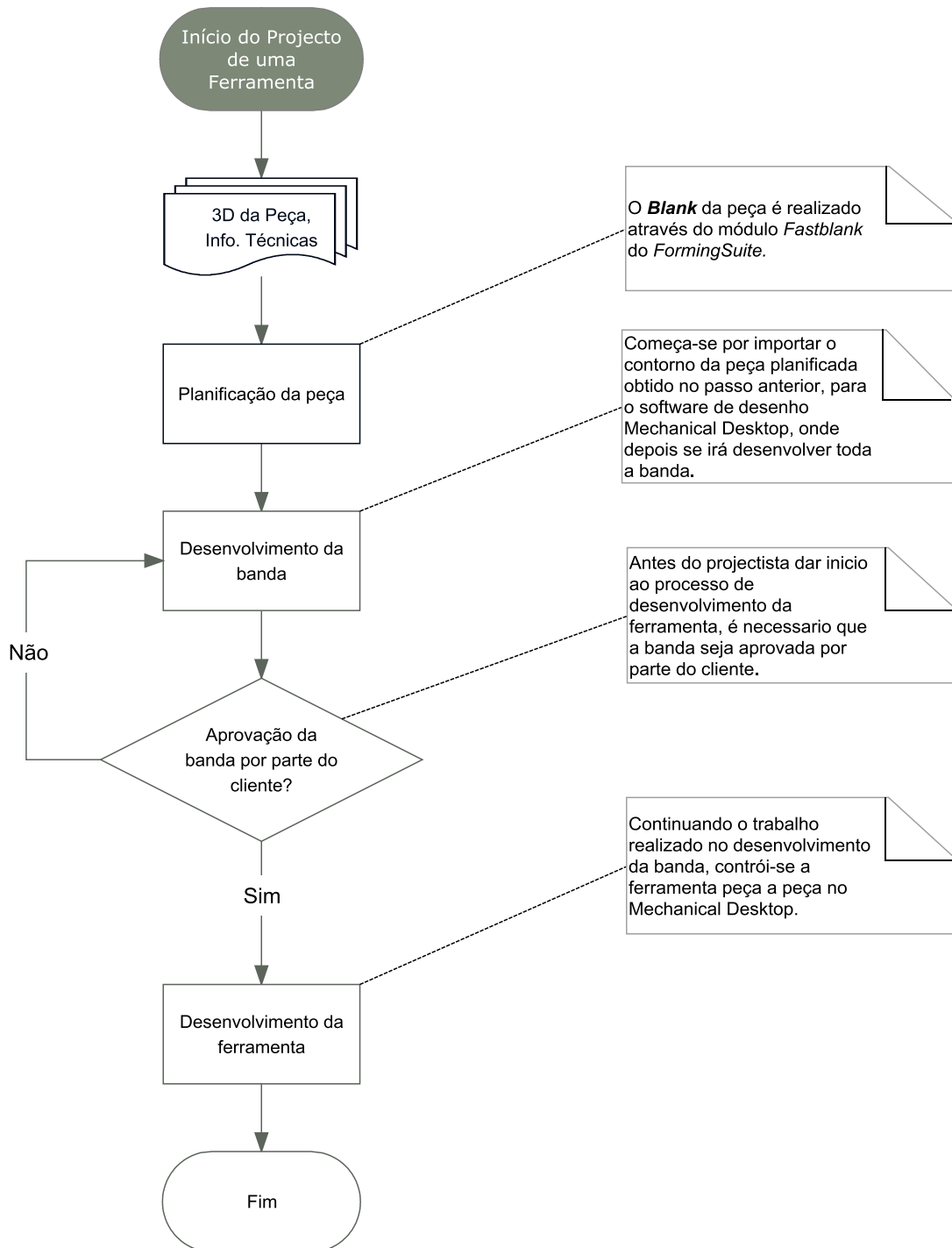


Fig. 3.2 – Fluxograma de trabalhos no gabinete técnico de projectos

3.2 Abordagens Propostas

Uma vez conhecida a empresa e a sua metodologia actual de trabalho, é necessário definir a abordagem a seguir na aplicação dos *software*. Visto que há dois tipos de *software* diferentes – autónomos e não autónomos –, ter-se-á que ter dois tipos de abordagens diferentes, uma para cada caso.

3.2.1 Abordagem para *Software* não Autónomos

No subcapítulo 2.4 verificou-se que no caso do objectivo principal pretendido ser o desenho da banda e da ferramenta de peças simples, estes *software* poderão ser soluções boas, permitindo acelerar o processo de desenho.

Visto estes serem *software* essencialmente de desenho, a abordagem a tomar na sua aplicação não irá variar muito da metodologia de trabalho actual, apresentada na Fig. 3.2. A diferença significativa reside no facto de agora todo o projecto ser feito através do *software* SolidWorks contendo a aplicação Logopress3 ou 3D Quickform.

O fluxograma detalhado da nova metodologia de trabalho encontra-se representado na Fig. 3.3. É possível observar não só a sequência de trabalho, como também, os módulos do *software* que estão a ser utilizados.

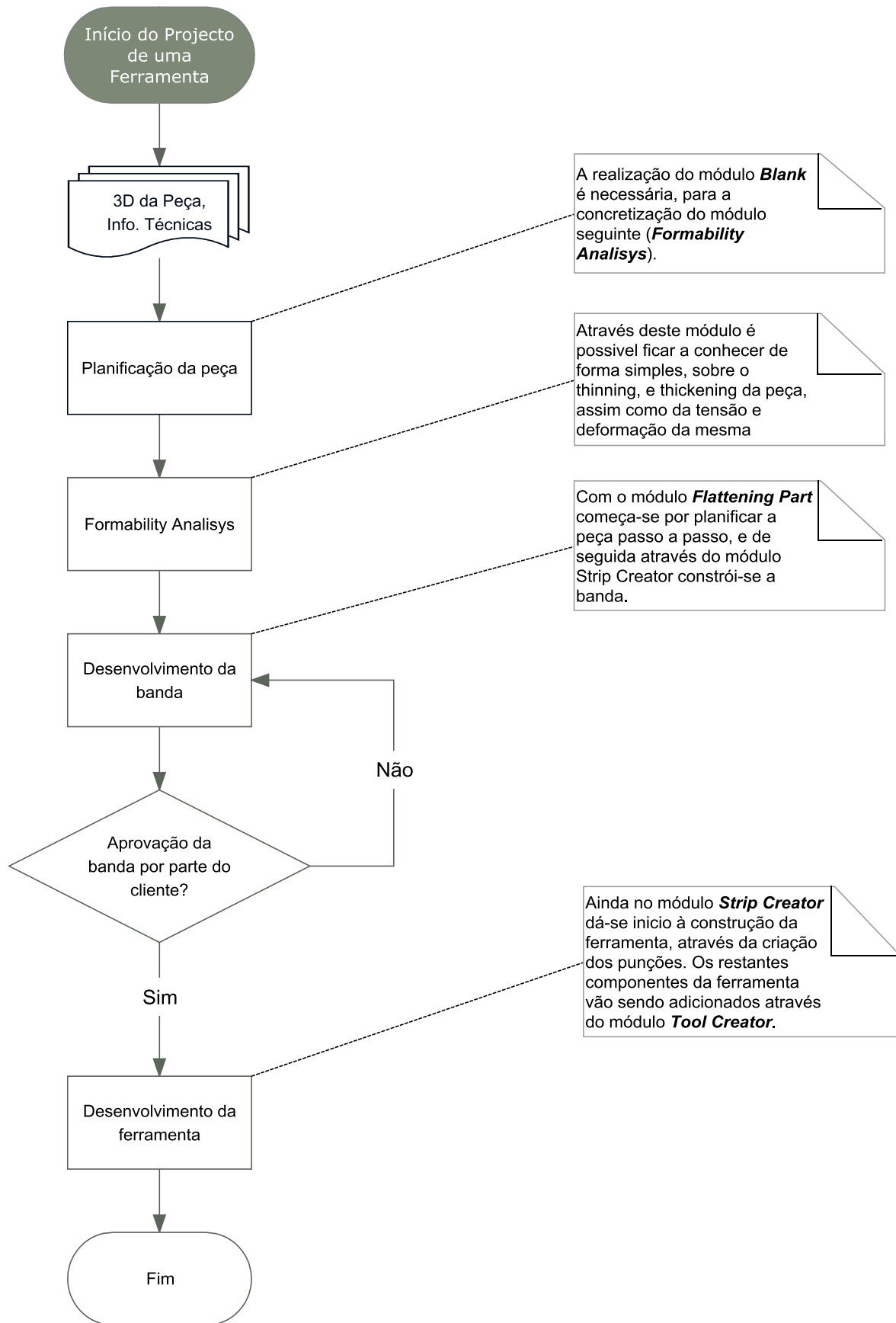


Fig. 3.3 – Fluxograma de trabalhos no gabinete técnico de projectos para *software* não autónomos

3.2.2 Abordagem para *Software* Autónomos

Ao contrário da abordagem para *software* não autónomos, onde as diferenças para a metodologia actual não eram muito significativas, na abordagem para *software* autónomos, as diferenças são grandes. Desde logo, existe a necessidade de criar a actividade de CAE dentro da área do gabinete técnico de projecto, assim como, a criação de um grupo de trabalho que ficará encarregue de analisar os resultados obtidos dessa actividade, numa perspectiva de Engenharia Simultânea.

A razão pela qual é necessária a criação desta actividade - ao invés de como nos casos anteriores ser o projectista responsável por todo o processo - reside no facto, de que desta forma com uma única licença de *software* é possível dar resposta às necessidades de vários projectistas, ficando estes apenas responsáveis pelo desenho da ferramenta. Esta é sem dúvida uma solução mais económica, dado o elevado preço das licenças. Para além disso, tem ainda a vantagem de permitir ao responsável pela actividade CAE, ganhar uma grande experiência, visto que todos os casos passarão por ele.

O trabalho dos projectistas não sofrerá grandes alterações, com a entrada dos *software* autónomos. O *software* de desenho que actualmente é utilizado não precisa de ser trocado, com a entrada do *software* de simulação. A diferença essencial no trabalho dos projectistas, está no facto de agora, terem o apoio dos resultados da simulação, para desenvolverem logo de início a melhor ferramenta possível. Este é um ponto importante para a introdução desta abordagem, uma vez que, apesar de muitas vezes ser necessária, a mudança nem sempre é bem vista por parte dos trabalhadores.

Alguns indivíduos estão mais aptos a lidar com a mudança, por terem desenvolvido uma perspectiva e uma experiência de trabalho ao longo da vida, que vê a mudança como uma oportunidade. Inicialmente, estas pessoas sentem a mesma desorientação, desconforto, e preocupação sobre os seus futuros como os outros. Mas, adaptam-se mais rapidamente, e tornam-se unidos com o processo.

Infelizmente, nem todos os trabalhadores se adaptam desta maneira. Onde alguns trabalhadores se adaptam, outros ficam presos. A mudança representa uma perda para estas pessoas. Esta perda é normalmente maior que qualquer ganho que possa advir da mudança.

Quando a mudança interfere com a maneira como as coisas são feitas, estas pessoas reagem com resistência. É comum ouvir reacções do tipo “nos bons velhos tempos” ou “a maneira como as coisas eram feitas” [22].

*“Progresso é uma palavra agradável. Mas mudança é o seu motivador
E a mudança tens os seus inimigos.”*

Robert Kennedy

Pretende-se com esta breve explicação sobre os efeitos da mudança nas pessoas, demonstrar a importância das alterações na forma de trabalho dos projectistas serem diminutas, com a aplicação da abordagem proposta. A única alteração significativa ao nível dos recursos humanos, trata-se da introdução do responsável pela actividade de CAE.

Como já foi referido, existe a necessidade de formar um grupo de trabalho que analisará os resultados obtidos por parte do departamento de CAE (ver Fig. 3.4). Este grupo de trabalho terá naturalmente que ser constituído por elementos com experiência no comportamento da chapa após ser deformada.

Observando o fluxograma da Fig. 3.1 verifica-se que os responsáveis pelas áreas de montagem e de ensaio da ferramenta, são os mais indicados para fazer parte deste grupo de trabalho, uma vez que, são eles que se encontram mais ligados ao ensaio da ferramenta e que habitualmente têm que encontrar uma solução para a corrigir. Para além destes dois elementos, devem fazer parte do grupo de trabalho dois elementos do gabinete técnico de projecto, mais especificamente, o projectista e o responsável pela simulação.

Na Fig. 3.5 pode observar-se a metodologia de trabalhos aquando da aplicação de *software* autónomos.



Fig. 3.4 - Grupo de trabalho para análise dos resultados da simulação

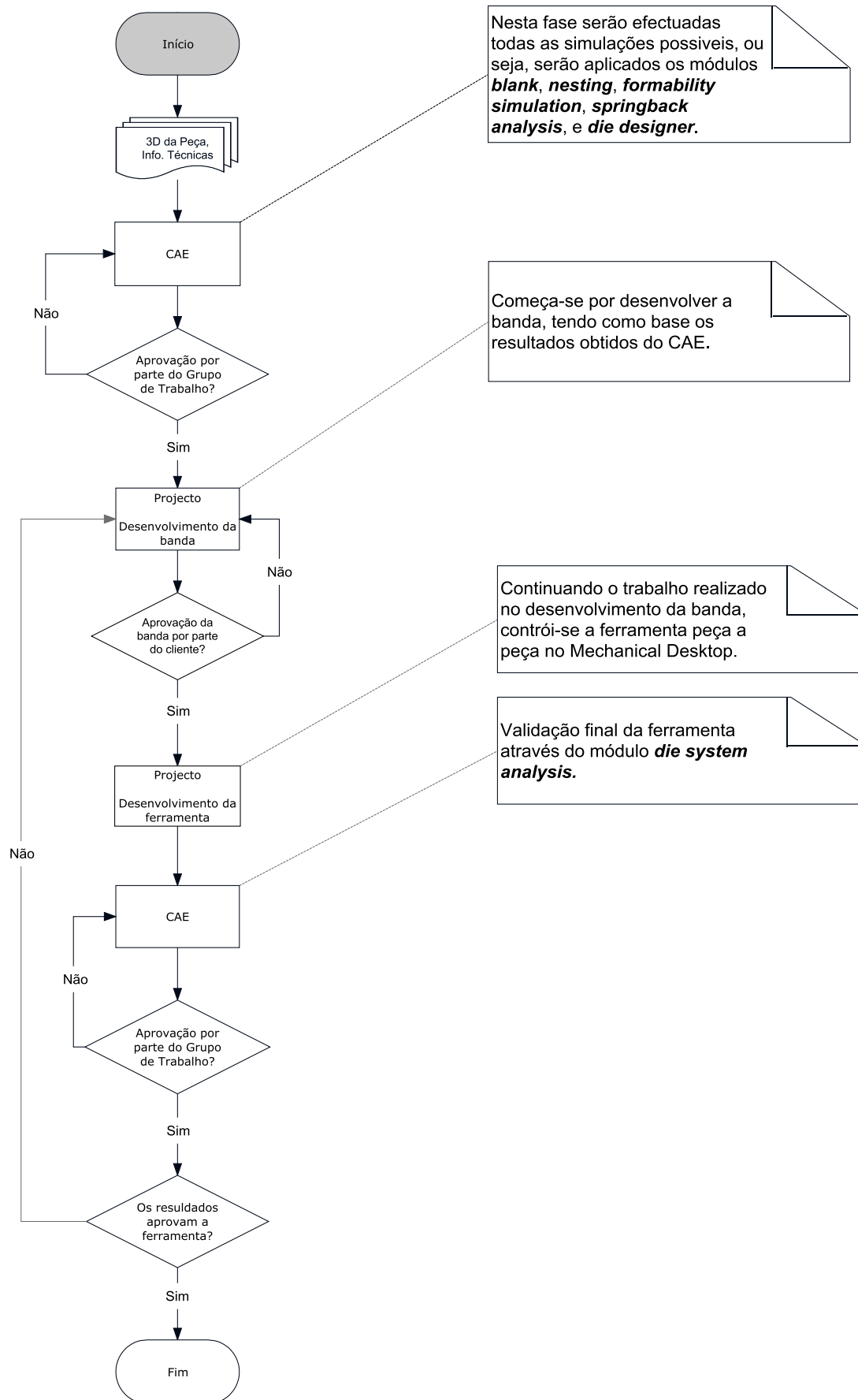


Fig. 3.5 – Fluxograma de trabalhos para *software* autónomos

4 Casos de Estudo

4.1 Introdução

Agora que já foram apresentados os *software* e respectivas avaliações, assim como as abordagens a seguir na sua aplicação, falta apenas testar as suas vantagens através do estudo de casos reais – ferramentas desenvolvidas na empresa.

Foram efectuados três casos de estudo, um para *software* não autónomos e dois para *software* autónomos. Deste modo foi possível testar os dois tipos de abordagens.

Para estes estudos foram utilizados três *software* que foram disponibilizados pelos fornecedores durante um período de teste. No caso dos *software* não autónomos, o *software* seleccionado foi o Logopress3 (<http://www.logopress3.com/>). Em relação aos *software* autónomos, devido à impossibilidade de testar o Autoform, as escolhas recaíram sobre o Dynaform (<http://www.eta.com/>) que, pelo estudo apresentado no capítulo 2, encontra-se a um nível de desempenho muito idêntico ao Autoform, e o Fastform Advanced que é um dos módulos do FormingSuite (<http://www.forming.com/>), podendo ser considerado como o *software* de entrada na simulação de estampagem.

As peças utilizadas foram escolhidas pelo autor da dissertação e pelo responsável do projecto na empresa, dentro de um universo de ferramentas já projectadas e fabricadas pela empresa. Esta escolha teve em conta o historial de problemas que a peça teve, o tempo que demorou o fabrico da ferramenta e a correcta adequação ao *software* a utilizar (ver Fig. 2.23).

4.2 Caso 1- Análise Experimental ao Logopress3

Neste subcapítulo apresenta-se o trabalho de teste realizado com o *software* Logopress3. O teste foi dividido em diferentes partes, consoante a análise que se pretende realizar.

Na Fig. 4.1 encontra-se ilustrado o menu principal do Logopress3, onde se pode observar os diferentes comandos. Destes comandos destacam-se o *Part Flattening*, *Analysis and Simulation*, *Unbending by Steps*, *Part Preparation* e *Creat/Edit Strip Layout*, uma vez que são estes que vão ser mais usados durante o teste.



Fig. 4.1 – Menu do Logopress3

4.2.1 Verificação de Detalhes Problemáticos

No subcapítulo 2.4 foi feita a análise de todos *software*, incluindo o Logopress3, com base na informação disponível, tendo sido indicado na Tabela 2.6 que o módulo *Flattening Part*, é limitado para peças simples (ver Fig. 1.1 – Exemplos de peças simples). Mas antes de testar este tipo de peças, testou-se o *software* para peças que aparentam ser simples, porém com pequenos detalhes que podem impossibilitar a correcta planificação da peça. Com isto pretendeu-se validar os resultados apresentados na Tabela 2.6 e colocar a descoberto algumas limitações do *software*.

Começou-se por testar a peça A apresentada na Fig. 4.2, que à primeira vista se enquadra dentro do tipo de peça simples. No entanto, na Fig. 4.3 observa-se que as linhas de dobra não são paralelas, facto que, ao tentar desfazer a dobra, provoca o erro apresentado na Fig. 4.4, durante a planificação da peça.

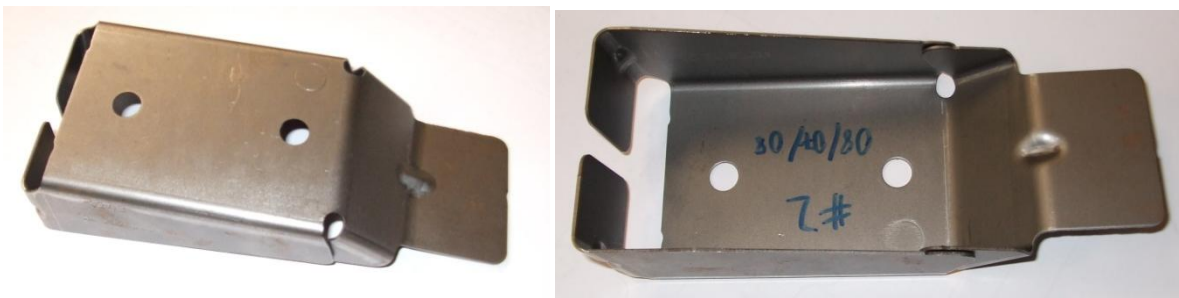


Fig. 4.2 – Fotografias da peça A

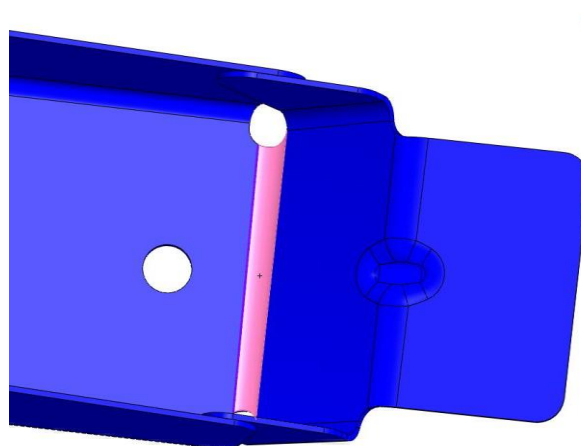


Fig. 4.3 – Indicação das linhas de dobra da peça A

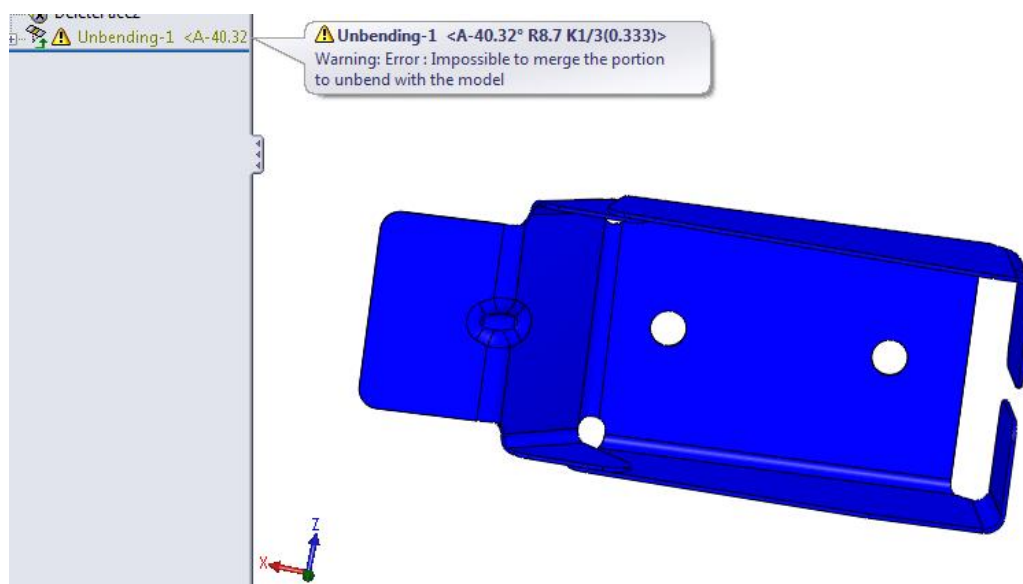


Fig. 4.4 – Mensagem de erro no desdobramento da peça A

Outro tipo de detalhe que pode vir a causar problemas na planificação, encontra-se indicado a azul na Fig. 4.5. O facto de haver continuidade da linha de dobra, nos cantos da peça, pode vir a apresentar-se como problemático. No lado esquerdo da figura, tem-se a peça original; no lado direito, a peça encontra-se simplificada após a remoção de um entalhe.

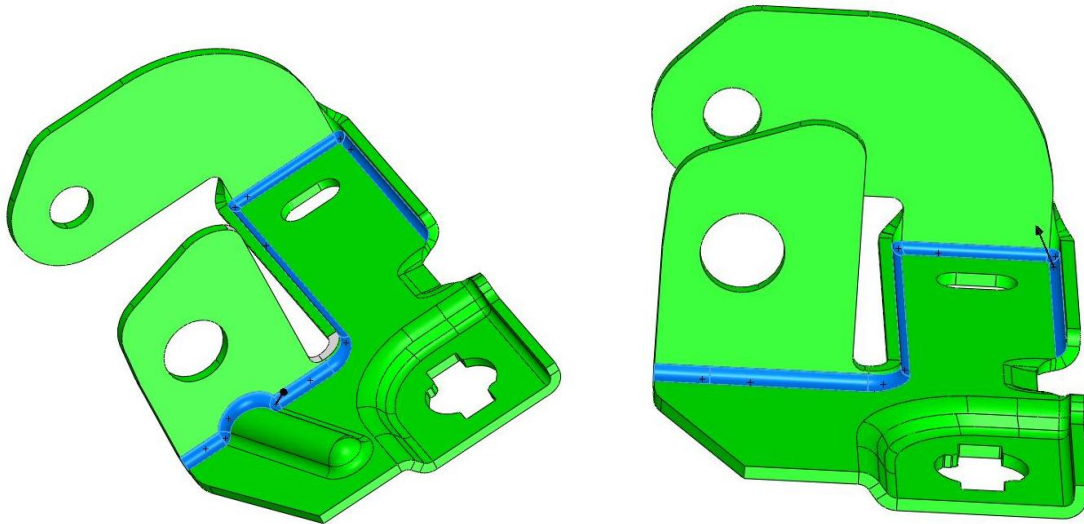


Fig. 4.5 – Indicação da linha de dobra da peça B

Em ambos os casos da peça B, não foi possível obter o desdobramento. Voltou-se a obter erros semelhantes ao da peça A.

Ficam assim identificados os seguintes detalhes como problemáticos:

- Linhas de dobra não paralelas
- Linhas de dobra com diversas curvaturas

Após esta análise verificou-se que os resultados apresentados na Tabela 2.6 estão correctos, sendo o módulo *Flattening Part (Unbending by Steps)*, exclusivo para peças simples.

4.2.2 Potencialidades do Logopress3 para Peças Não-Simples

Verificou-se que não é possível planificar passo a passo peças complexas, ou que possuam detalhes problemáticos. Coloca-se então a seguinte pergunta: será possível planificar qualquer tipo de peça em apenas um passo, incluindo peças complexas, de forma a obter-se o contorno da peça planificada?

Na Fig. 4.6 tem-se um exemplo de uma peça complexa, feita recentemente pela APAL. Determinou-se o contorno teórico da peça através do módulo *Flattening Part (Part Flattening)*. De maneira a validar este resultado, o contorno obtido foi comparado com o contorno utilizado para o desenho da banda obtido na empresa, utilizando o FastBlank. É de referir que o contorno utilizado produziu um bom efeito, uma vez que conduziu a pouco desperdício.

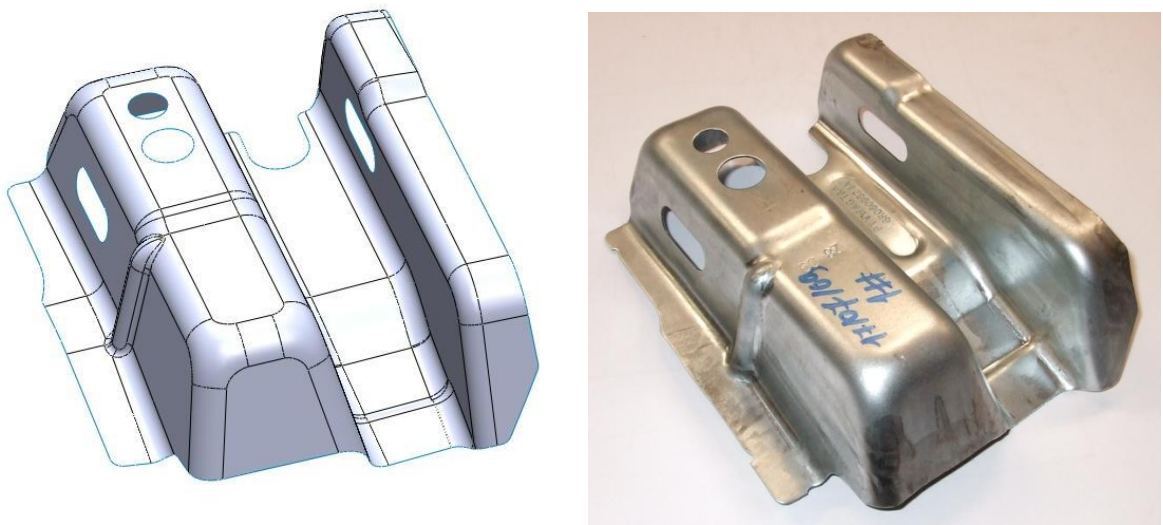


Fig. 4.6 – Desenho CAD e fotografia da peça C

A preparação da peça é uma tarefa simples. Olhando para a Fig. 4.7 verifica-se que existem três informações distintas a indicar. Na primeira (*Reference face*), é indicada qual a face de referência da peça em relação ao plano da ferramenta; na segunda (*Thickness*), é indicada a espessura da peça no caso da análise ser realizada apenas com uma superfície da peça; na terceira (*General parameters*), as informações mais importantes a indicar referem-se ao material da peça e ao tipo de *mesh* a aplicar (*Express*, *Normal*, *Fine*, e *Very fine*).

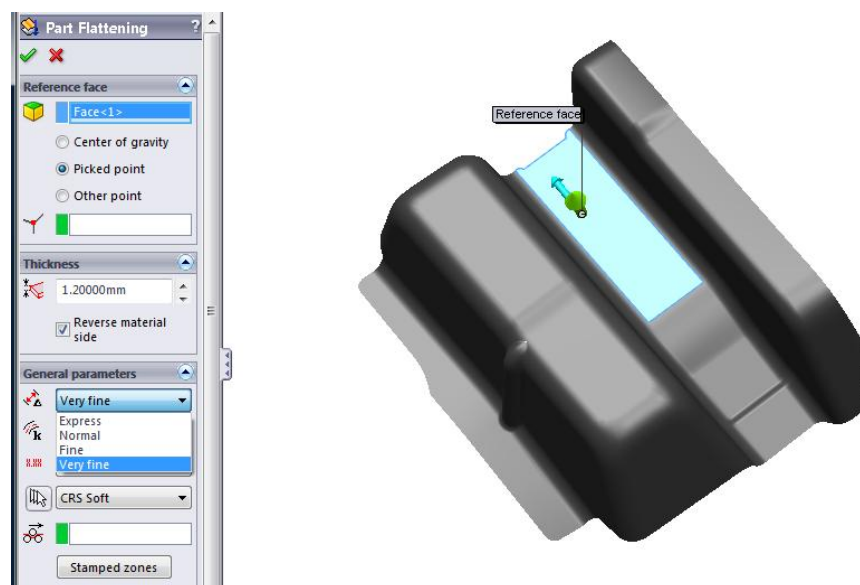


Fig. 4.7 – Preparação da peça C para planificação (Logopress3)

O resultado da planificação obtida pelo Logopress3 encontra-se apresentado no lado esquerdo da Fig. 4.8. Facilmente se verifica à vista desarmada, que as diferenças são significativas.

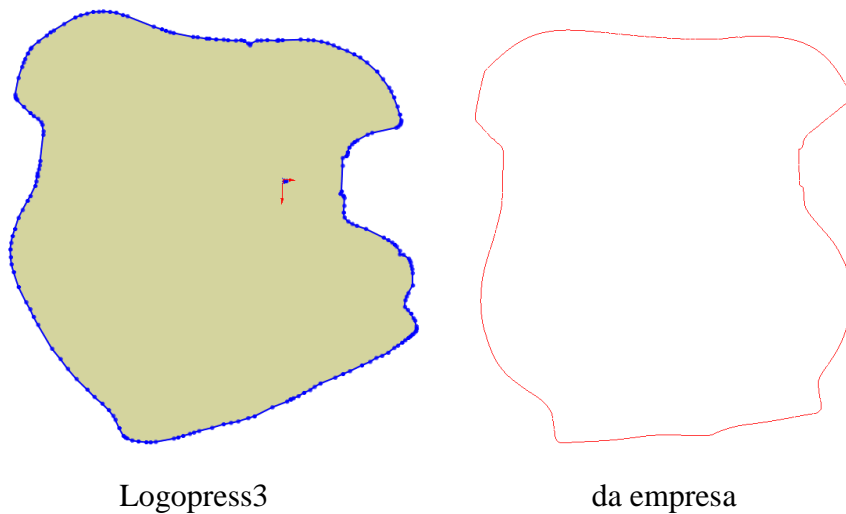


Fig. 4.8 – Comparação entre dois planificados da peça C

Através da comparação dos dois contornos é possível concluir que o Logopress3 não oferece uma ferramenta que dê garantias de uma correcta planificação de peças complexas.

Este é um detalhe importante, uma vez que acaba por limitar quase na sua totalidade o Logopress3 para o desenho de ferramentas simples. O facto de o utilizador ter pouco controlo na *mesh* aplicada à peça, pode ser uma das razões para a falta de precisão dos resultados.

Outra ferramenta que o Logopress3 possui, e que pode ser utilizada para qualquer tipo de peça é a *Analysis and Simulation*. Esta ferramenta permite observar através de um vídeo, as zonas da peça onde a tensão e o deslocamento são máximos e mínimos.

Para a realização dos cálculos, o *software* utiliza a informação indicada na preparação da peça e apresentada na Fig. 4.7. Observando as Fig. 4.9 e Fig. 4.10 é possível destacar uma esquina da peça (ver seta) como potencial zona crítica. Essa é uma zona onde a tensão e o deslocamento na peça é máximo. No entanto, devido à falta de valores não é possível garantir que existirão problemas nessa zona.

Analisando a peça C confirmam-se os resultados da simulação, uma vez que a zona identificada como potencialmente crítica foi aquela que deu mais problemas. Nessa zona existiu uma elevada sobreposição de material, como pode ser observado na Fig. 4.11.

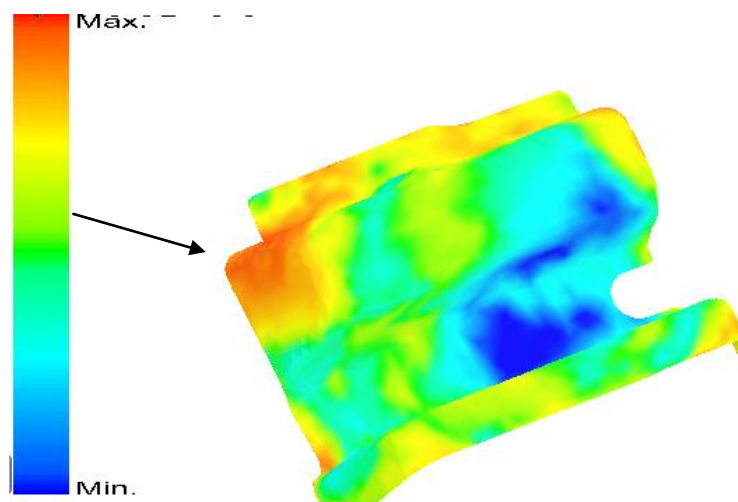


Fig. 4.9 – Resultados da simulação da tensão ao longo da peça C (Logopress3)

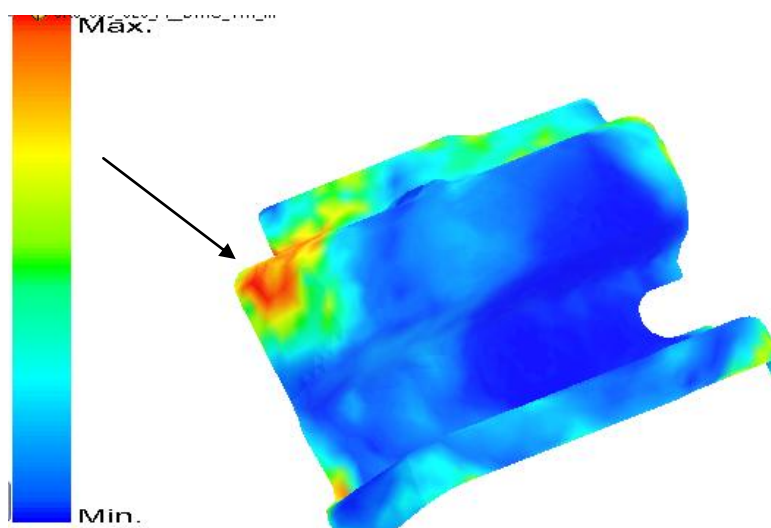


Fig. 4.10 - Resultados da simulação do deslocamento ao longo da peça C (Logopress3)



Fig. 4.11 – Fotografia de detalhe da peça C

4.2.3 Desenvolvimento da Banda para uma Peça Simples

O desenvolvimento da banda é um processo importante no fabrico da ferramenta. É nesta fase que se define toda a sequência de fabrico da peça e, como tal, irá ter uma importância elevada sobre o custo final da peça e da ferramenta.

Neste subcapítulo apresenta-se a análise à capacidade do Logopress3 no desenvolvimento da banda para uma peça “simples”. Na peça em questão, trata-se de uma peça cujo projecto já se encontra concluído na APAL, mas a fase de fabrico ainda não foi iniciada. Este facto permite, fazer uma análise comparativa entre o processo tradicional e o novo processo com utilização do Logopress3, onde será possível destacar as vantagens e desvantagens dos dois.

Durante todo o processo registou-se os tempos das diferentes tarefas. Isto incluiu não só o tempo necessário para o desenvolvimento da banda como, também, o tempo necessário para efectuar diferentes tipos de alterações na banda.

Antes de se utilizar o Logopress3 é necessário definir qual vai ser a sequência de fabrico. Esta sequência pode ser depois alterada sem ser necessário recomeçar do zero. Para a peça apresentada na Fig. 4.12, definiu-se a sequência de trabalho apresentada na Tabela 4.1.



Fig. 4.12 – Desenho CAD da peça “simples” D


Uma vez definida a sequência da banda, deu-se início ao processo de desenho da mesma, através do Logopress3. A primeira tarefa consiste no desdobramento e remoção de furos da peça D, até se obter uma chapa plana e sem furos. Da proposta de sequência de passos apresentada na Tabela 4.1, existem três postos onde ocorre acção sobre a peça. São estes que vão ter que ser identificados através da colocação de *STATION MARKS* ().

Tabela 4.1 – Sequência proposta para fabrico da peça

Posto	Função	Acção sobre a peça?
1º	Recorta e fura	Não
2º	Recorta	Não
3º	Recorta	Não
4º	Recorta e fura	Sim
5º	Dobra patilha para cima	Sim
6º	Dobra abas para baixo	Sim
7º	Vazio	Não
8º	Separação	Não

Da Fig. 4.13 à Fig. 4.16 é possível observar do lado esquerdo da imagem a sequência de fabrico, onde cada *STATION MARK* corresponde a um novo posto, e no lado direito da imagem, o estado da peça no início do posto.

Esta primeira tarefa (planificação e remoção dos furos da peça) demorou aproximadamente 10 minutos.

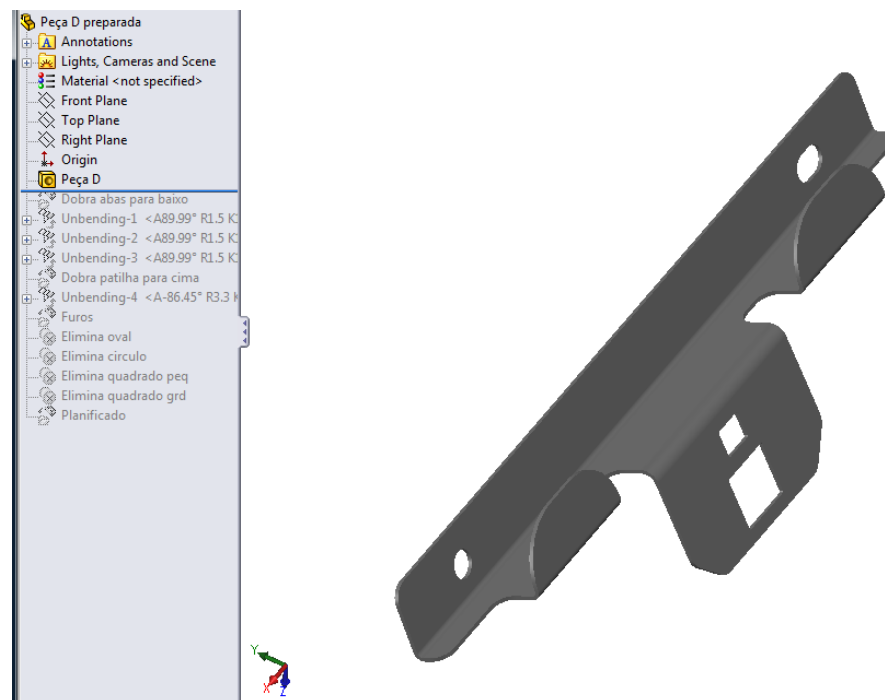


Fig. 4.13 – Estado inicial da peça D nos postos 7 e 8

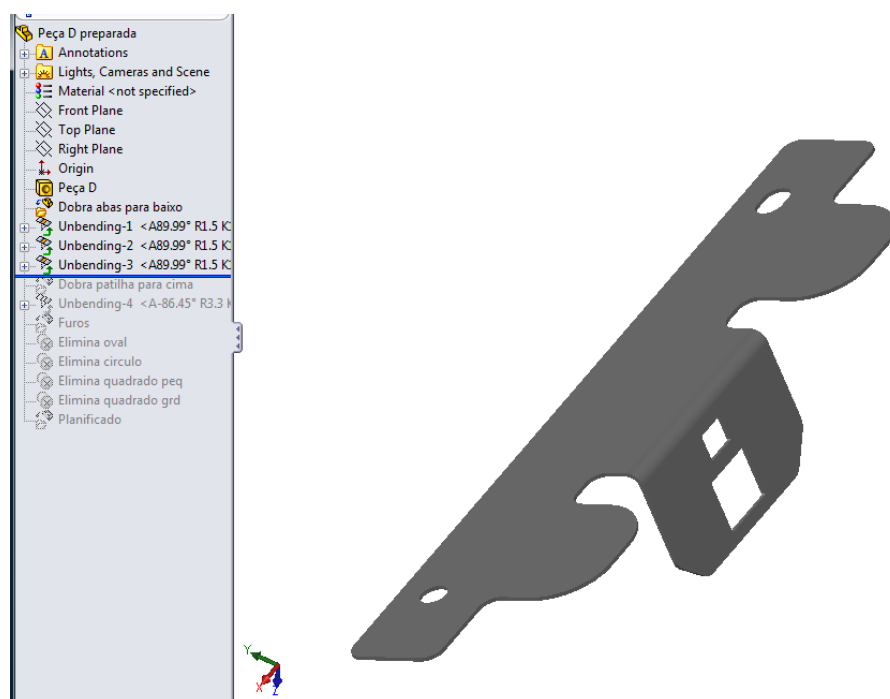


Fig. 4.14 – Estado inicial da peça D no posto 6

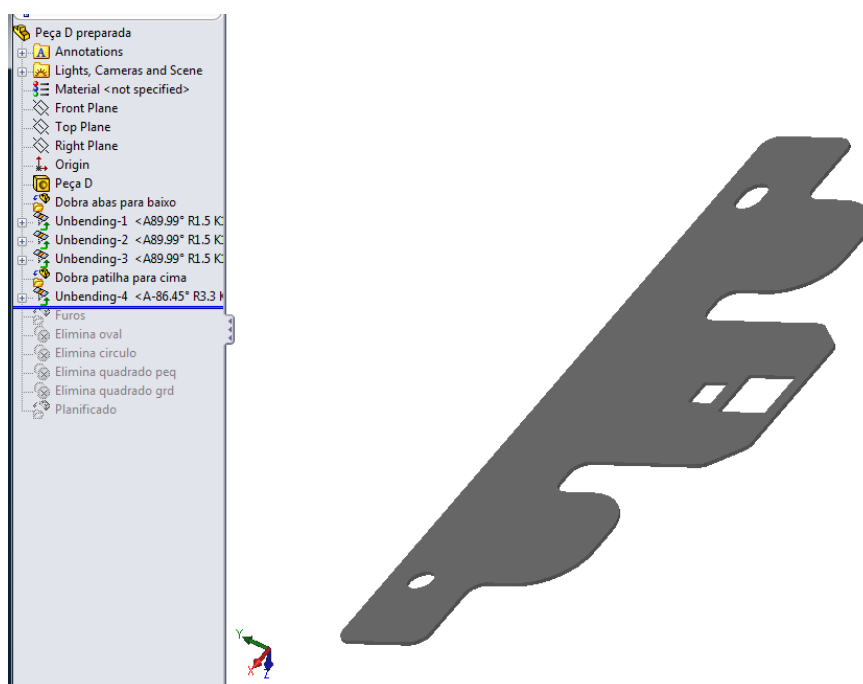


Fig. 4.15 – Estado inicial da peça D no posto 5

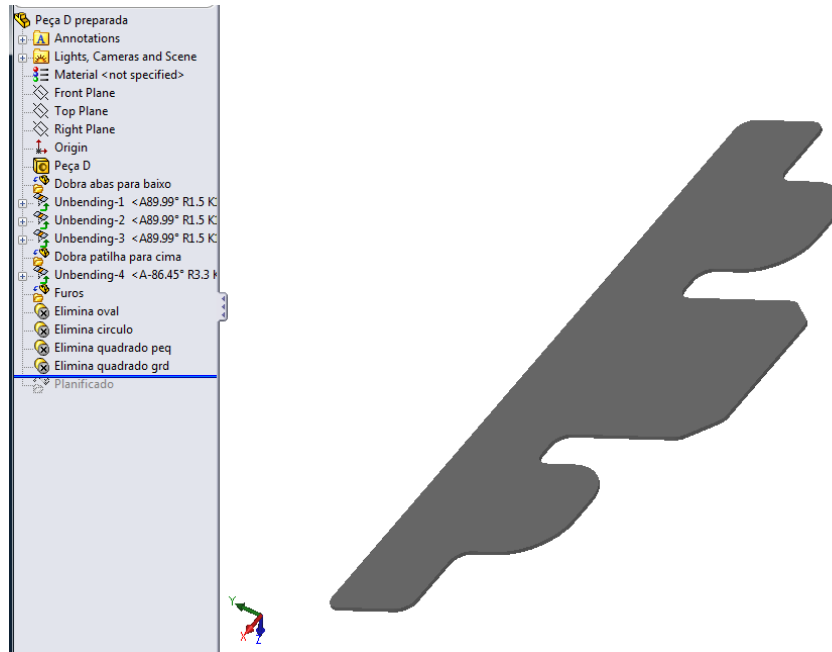


Fig. 4.16 – Estado inicial da peça D no posto 4

Após realizada a planificação da peça, a tarefa seguinte consiste na preparação da peça para o módulo seguinte (*Creat/Edit Strip Layout*). Através da ferramenta *Part Preparation* indica-se a face de referência da peça em relação à ferramenta de estampagem, a aresta paralela à banda e a aresta de início da peça (ver Fig. 4.17). Esta tarefa (preparação da peça para criação da banda) demorou aproximadamente 1 minuto.

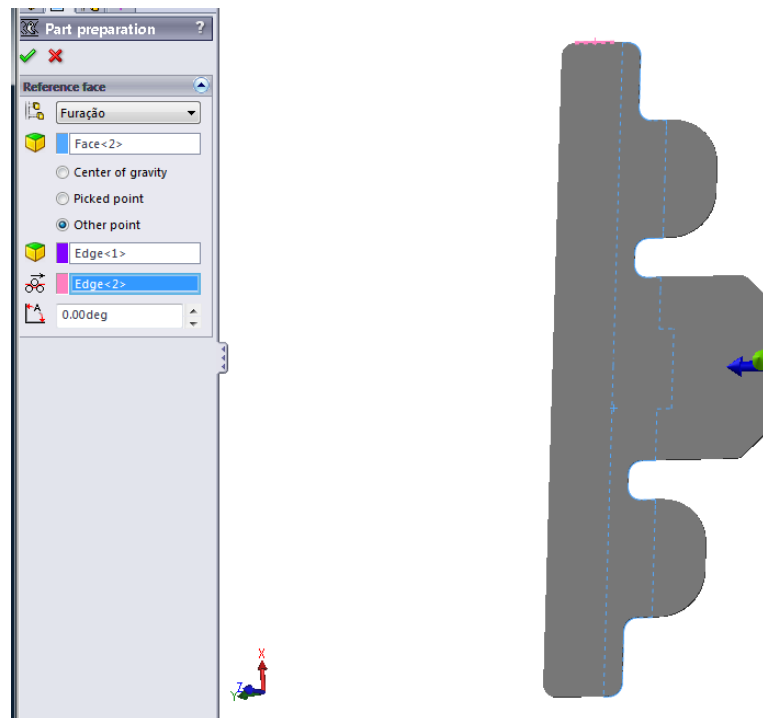


Fig. 4.17 – *Part preparation* (peça D)

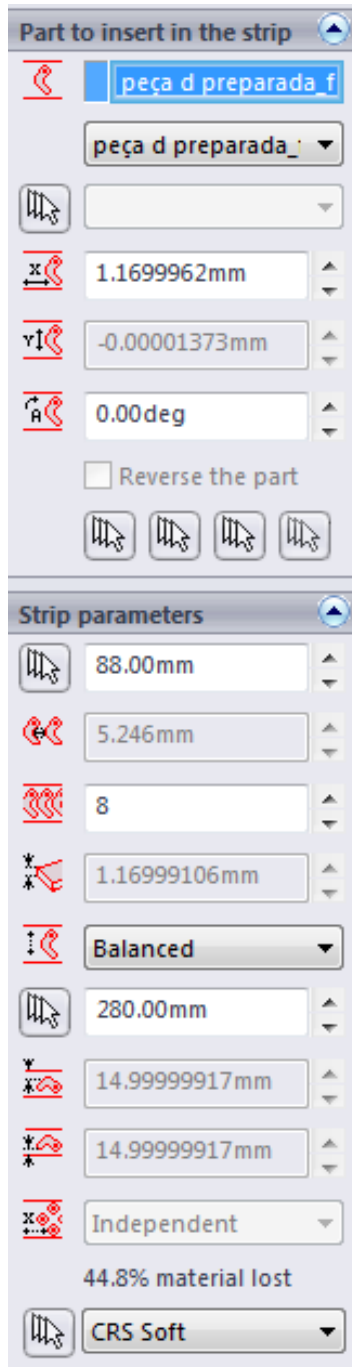


Fig. 4.18 – Menu de edição da banda

O passo seguinte é um passo importante, pois as decisões tomadas influenciam o desperdício de material.

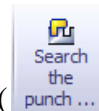
Na Fig. 4.18 pode observar-se os parâmetros possíveis de ajustar de forma a obter o menor desperdício de material, sem desrespeitar as recomendações de projecto. Como é fácil compreender, não é possível ajustar todos os parâmetros, visto que uns dependem de outros. Por exemplo, ao definirmos o passo, estamos automaticamente a definir a distância entre peças.

Para a banda em estudo não foi necessário rodar a peça, visto que a posição em que se encontrava era a mais adequada. Definiu-se apenas o passo da banda (88 mm), a largura da banda (280 mm), o número de postos (8 postos), e que a peça está distribuída de forma uniforme na banda (*Balanced*).

Na zona inferior da Fig. 4.18 é indicada a percentagem de material desperdiçado. Para este passo e largura de banda essa percentagem é de 44,8%.

Esta tarefa (preparação da banda) demorou aproximadamente 4 minutos.

Para terminar o desenvolvimento da banda, falta apenas definir os punções de corte. Esta é a tarefa mais demorada de todo o processo, mas graças a dois comandos específicos é possível reduzir este tempo. O comando *Search*



the Punch Outline (*Search the punch ...*) encontra automaticamente o contorno da peça numa área previamente definida pelo utilizador.



O comando *Punch Mismatch* (*Punch Mismatch*), através da indicação de duas arestas, cria o entalhe necessário no punção de modo a evitar arestas vivas na peça.

Esta tarefa (criação dos punções de corte) demorou aproximadamente 60 minutos.

O resultado destas tarefas é apresentado na Fig. 4.19.

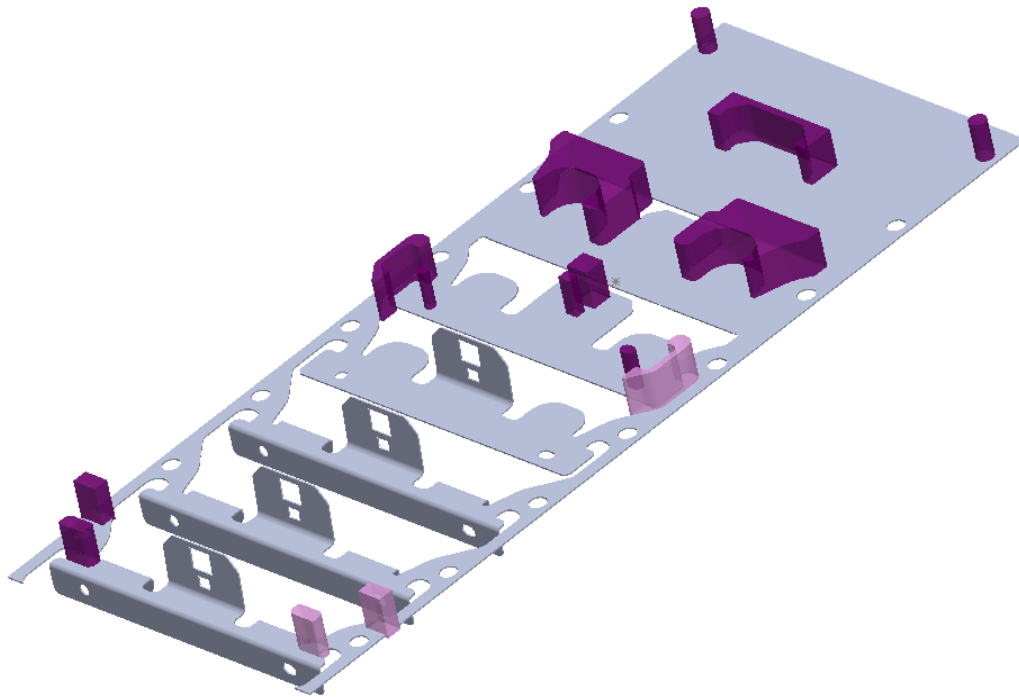


Fig. 4.19 – Perspectiva da banda da peça D com punções incluídos

Em qualquer fase do projecto é possível proceder a alterações na banda sem perder muito tempo, incluindo após a conclusão da mesma. Em apenas alguns minutos o projectista pode mudar a largura da banda, o passo, trocar a sequência de tarefas, aumentar o número de postos, entre outros detalhes.

Após a conclusão do desenvolvimento da banda através do Logopress3, é possível comparar os resultados com aqueles obtidos pelo método tradicional. Através do método tradicional foram registadas 5 horas de trabalho (informação fornecida pelo responsável do projecto), o que comparando com o tempo total apresentado na Tabela 4.2, representa um acréscimo de 3 horas e 45 minutos em relação ao tempo gasto utilizando o Logopress3. Esta é uma diferença bastante significativa, uma vez que estamos a falar de uma redução de 75% no tempo de desenvolvimento da banda.

Para além da redução do tempo, também a níveis qualitativos existem vantagens. A banda deixa de ser um mero desenho em 2D, para passar a ser um desenho em 3D (ver Fig. 4.19) com todas as vantagens que daí advêm para melhor visualização e interpretação.

Tabela 4.2 - Tempo total de desenvolvimento da banda da peça D através do Logopress3

Tarefa Nº	Função	Tempo aproximado (min)
1	Planificação e remoção dos furos da peça	10
2	Preparação da peça para criação da banda	1
3	Preparação da banda	4
4	Criação dos punções de corte	60
		TOTAL: 75 minutos

Outra vantagem da utilização do Logopress3 é a obtenção automática de um relatório sumário da banda (ver Tabela 4.3). Neste relatório, para além das informações básicas como o passo, a largura da banda, número de postos e percentagem de material desperdiçada, apresenta também a informação relativa à força de corte, força de dobra, força total, o perímetro dos punções de corte e o peso do material gasto por passo. Este valor representa a quantidade de material necessário para produzir uma peça.

Tabela 4.3 - Relatório sumário da banda em formato Excel (Logopress3)

Logopress3 Strip summary information	
Step	88.000mm
Strip width	280.000mm
Thickness	1.170mm
Total Force	52 T
Total Cutting Force	50.28 T
Total Forming Force	1.39 T
Stations number	8
% material lost	44%
Cutting punches perimeter	1662.172mm
Weight of the part peça d preparada_for_strip3-1	124.150 Gr
Unit basic weight	224.863 Gr

Por fim, existe ainda a vantagem de ao desenhar já nesta fase os punções em 3D, poupar-se tempo e trabalho para a fase seguinte do desenho da ferramenta.

Na Fig. 4.20 e na Fig. 4.21 pode comparar-se as bandas obtidas pelos dois processos.

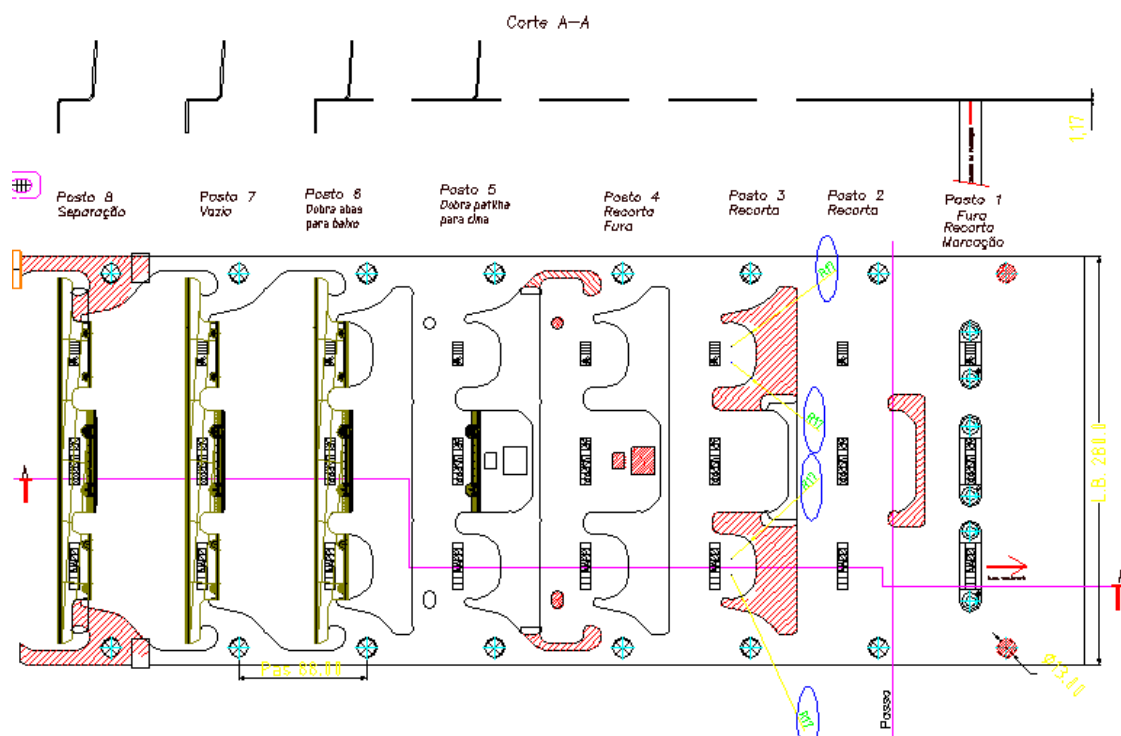


Fig. 4.20 – Desenho da banda da peça D obtido pelo método tradicional na empresa

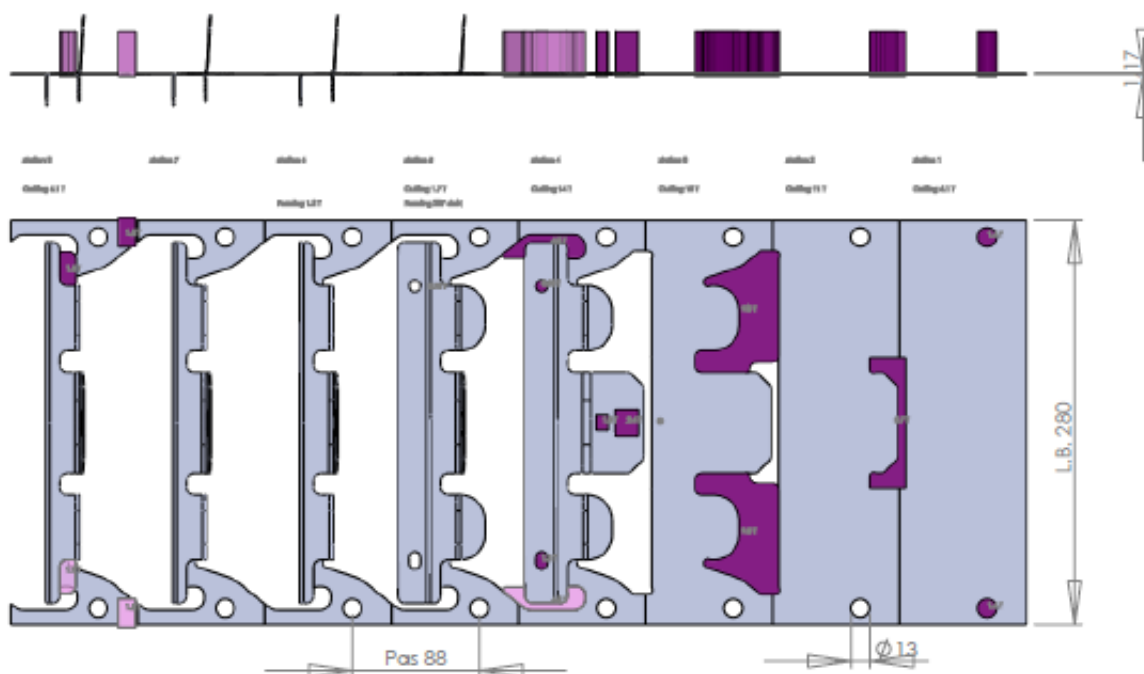


Fig. 4.21 - Desenho da banda da peça D obtido pelo Logopress3

4.2.4 Conclusões

Este estudo permitiu tirar qualquer dúvida que pudesse existir relativamente ao tipo de peça para o qual o *software* se aplica. O Logopress3 é um *software* pensado sobretudo para peças simples.

Para peças não simples é possível aplicar as ferramentas *Part Flattening* para planificar a peça de uma só vez, e *Analysis and Simulation* para determinar as zonas da peça onde a tensão e o deslocamento são máximos e mínimos. No entanto, os resultados obtidos não são extremamente seguros. No caso da planificação da peça ensaiada, o contorno obtido desviou-se consideravelmente do contorno real; já no caso da simulação, os resultados obtidos foram razoáveis, mas a falta de valores tira alguma expressão aos mesmos.

A aplicação do Logopress3 para peças simples provou ser bastante útil e eficaz. É possível poupar bastante tempo no desenho da banda e obter um resultado superior. Para além do tempo de desenho da banda ser curto, também o tempo para proceder a alterações o é, podendo o projectista deste modo, num só dia propor e analisar diferentes desenhos de banda.

Neste estudo não foi experimentado o Logopress3 para o desenho da ferramenta, uma vez que este é um processo demorado, e que no final os resultados poderiam ser inconclusivos. O facto do processo de desenho ainda não se encontrar experimentado como no processo tradicional, e a necessidade de introduzir um grande número de peças na biblioteca de componentes, levaram à tomada de decisão de não efectuar este estudo. No entanto, fica a ideia de que a partir do momento em que o processo de desenho através do Logopress3 se encontre numa utilização corrente, e a biblioteca de componentes esteja completa, este seja um processo mais rápido que o utilizado actualmente.

Visto isto, pode concluir-se que o Logopress3 pode ser um *software* muito útil para aqueles que produzam anualmente um número de ferramentas simples, que justifique o custo anual do *software*.

4.3 Caso 2- Análise Experimental ao Fastform Advanced

4.3.1 Introdução

O caso de estudo número 2 consiste na análise experimental ao *software* Fastform Advanced, um dos módulos comercializados pela FTI/FormingSuite. Através deste módulo são gerados diversos resultados, na sua maioria relacionados com as capacidades de enformação da peça (*Formability Simulation*). Com base no fluxograma de trabalhos para *software* autónomos (Fig. 3.5), os resultados são analisados pelo grupo de trabalho, cujas conclusões são apresentadas e discutidas.

A peça E que pode ser observada na Fig. 4.22, foi a peça seleccionada para este estudo. Trata-se de uma peça de dimensões consideráveis (aproximadamente 350 mm de largura) e fabricada em aço de resistência elevada, em chapa com 0,97 mm de espessura.

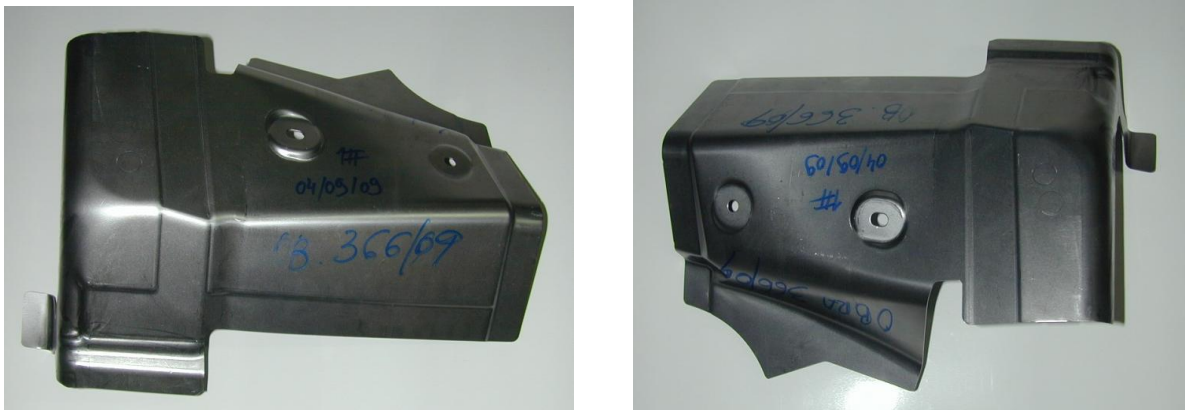


Fig. 4.22 – Fotografias da peça E

Ao longo do estudo são apresentados todos os passos necessários para a obtenção dos resultados e registados os tempos de cada operação. Uma vez que os tempos de cálculo da simulação variam consoante as características de cada computador, na Tabela 4.4 encontram-se as características essenciais do computador usado neste estudo.

Tabela 4.4 - Características do computador usado no caso 2

Processador:	Intel Pentium 4 CPU 3.00 GHz
Memória:	2.00 GB de RAM
Sistema Operativo:	Windows XP Professional

4.3.2 Preparação da Simulação

O primeiro passo da simulação consiste em importar o desenho 3D da peça para o *Fastform Advanced*. Uma vez que se trabalha com elementos finitos, de forma a acelerar o processo de simulação importa-se apenas uma superfície da peça em formato IGES (formato universal para desenhos CAD), sendo a espessura da peça mais tarde indicada (Fig. 4.23).

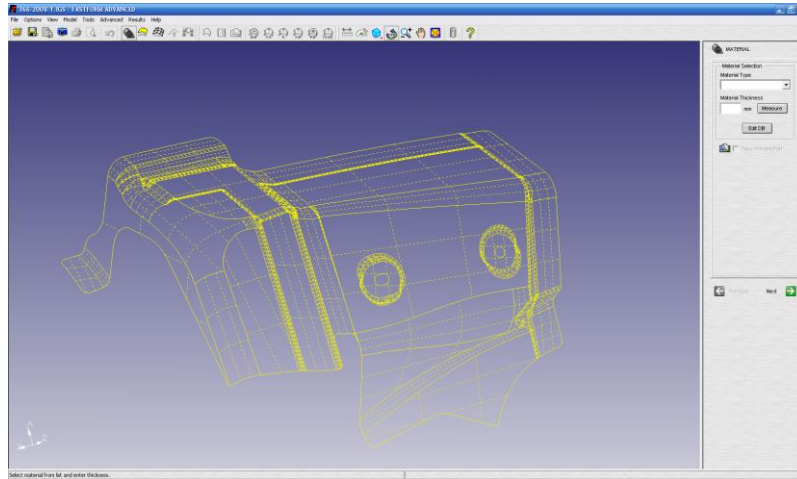


Fig. 4.23 – *Fastform Advanced* após a importação inicial da peça

Após a importação da peça é necessário indicar o material desta. Existe uma base de dados com diversos materiais, mas caso o material que é pretendido não esteja incluído, como é o caso, é também possível adicionar novos materiais. Aqui é muito importante obter todas as propriedades do material, pois caso contrário alguns resultados poderão não ter qualquer valor.

Na Fig. 4.24 é possível observar a base de dados já com o material da peça E introduzido (aço E 335 D). Esta designação está de acordo com a norma francesa NF A36-203, visto que a peça E é uma peça a ser fabricada para um construtor automóvel francês. Em baixo são apresentadas as definições de cada propriedade.

A etapa seguinte consiste na preparação da peça para a simulação, o que neste caso significa a remoção dos furos da peça E. Através desta ferramenta de edição da geometria é possível remover pontos, linhas e superfícies da peça. Na Fig. 4.25 encontra-se seleccionado a roxo os furos que serão removidos.

Uma vez concluída a preparação da peça está-se em condições de realizar a *mesh* (malha) da peça. O tamanho dos elementos irá depois influenciar a exactidão da análise. Sempre que o número de elementos é duplicado o tempo de cálculo quadruplica.

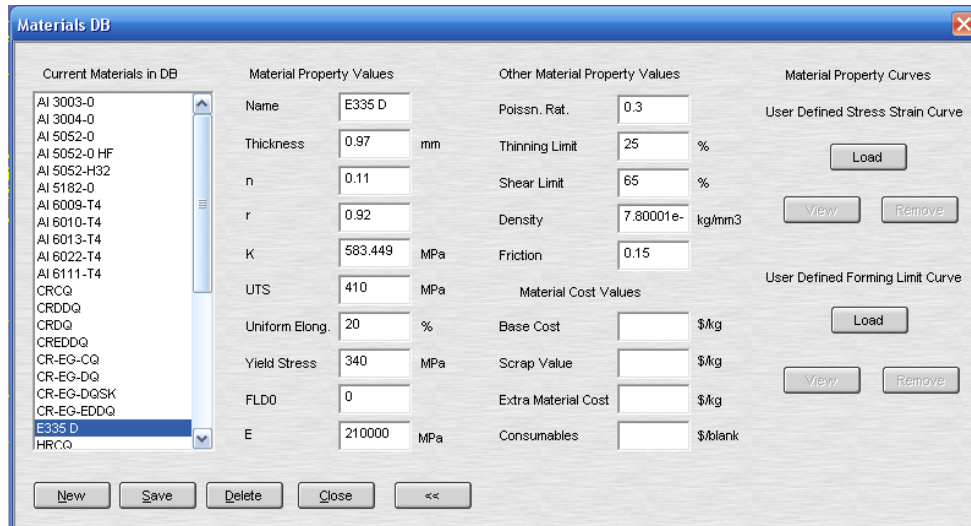


Fig. 4.24 – Características do material usado na peça E (base de dados do *Fastform Advanced*)

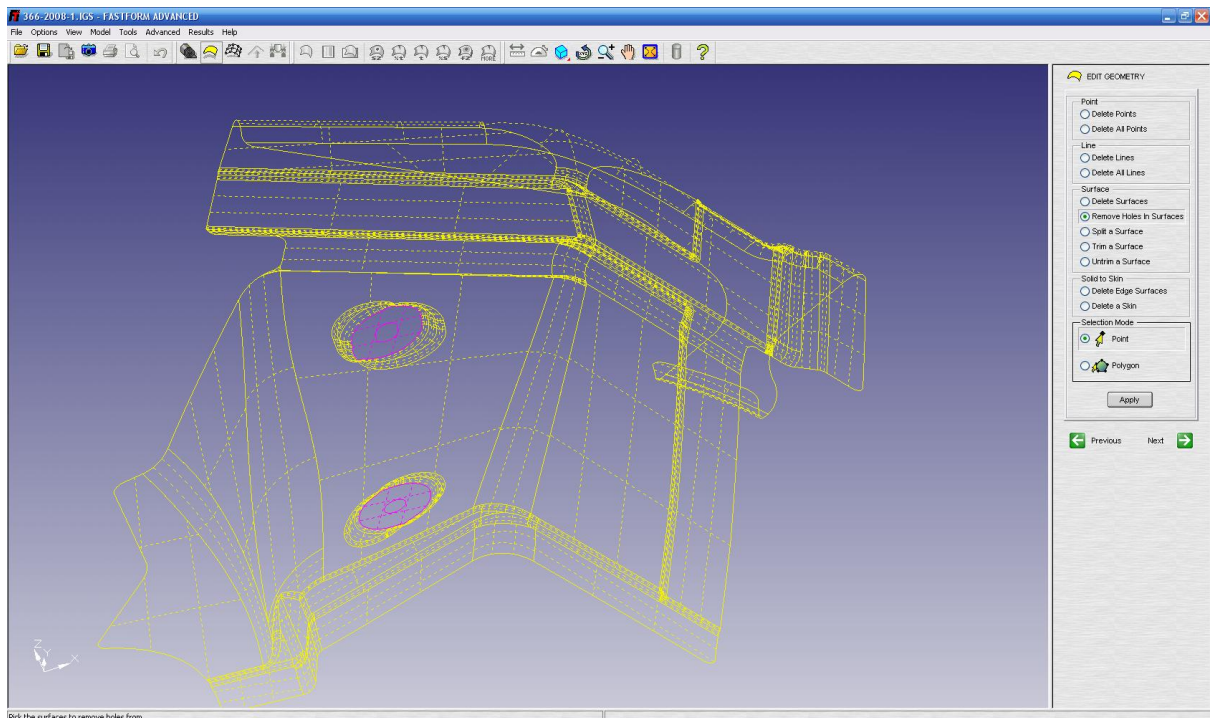


Fig. 4.25 – Remoção dos furos da peça E (*Fastform Advanced*)

Como a superfície importada corresponde à superfície superior da peça, é aconselhável fazer um *offset* da *mesh* para o plano intermédio. Neste caso, faz-se um offset de -0,485, que corresponde a metade da espessura da peça. A *mesh* obtida encontra-se apresentada na Fig. 4.26 e foi gerada em aproximadamente 30 segundos.

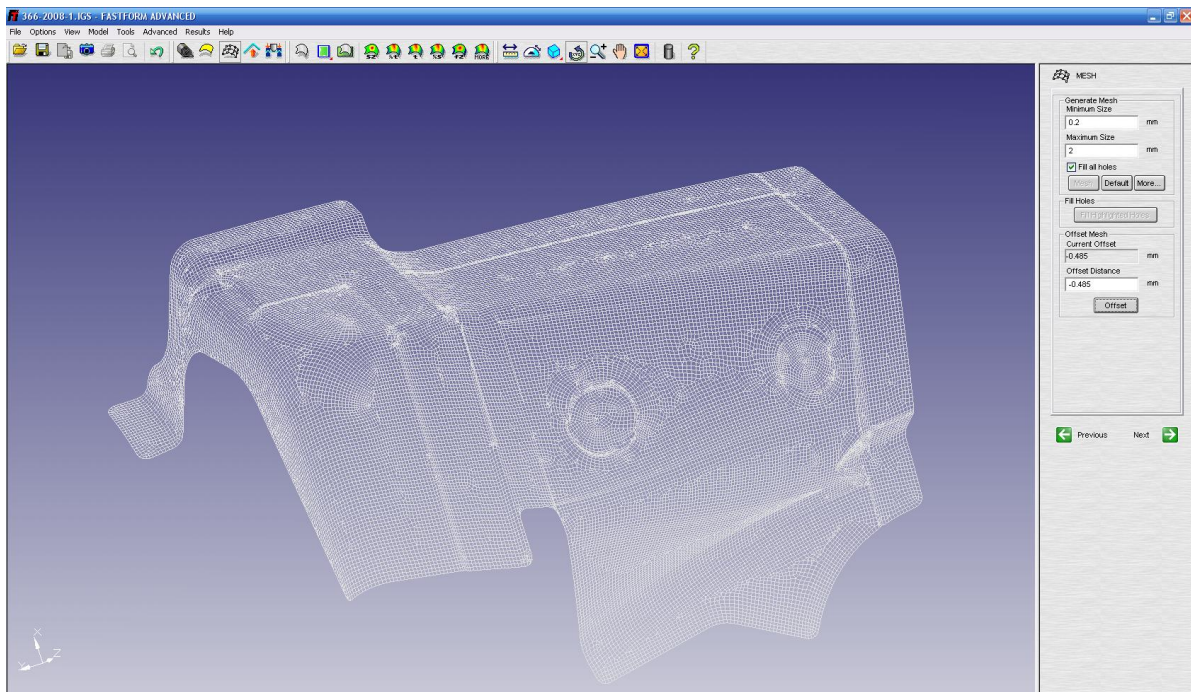


Fig. 4.26 – Mesh da peça E (*Fastform Advanced*)

De forma a realizar uma análise da capacidade de enformação da peça, o *Fastform Advanced* requer que a peça esteja orientada com o eixo do Z a apontar na direcção de fecho da prensa. Esta afinação no posicionamento da peça é feita através da ferramenta *Tipping*, ilustrada na Fig. 4.27.

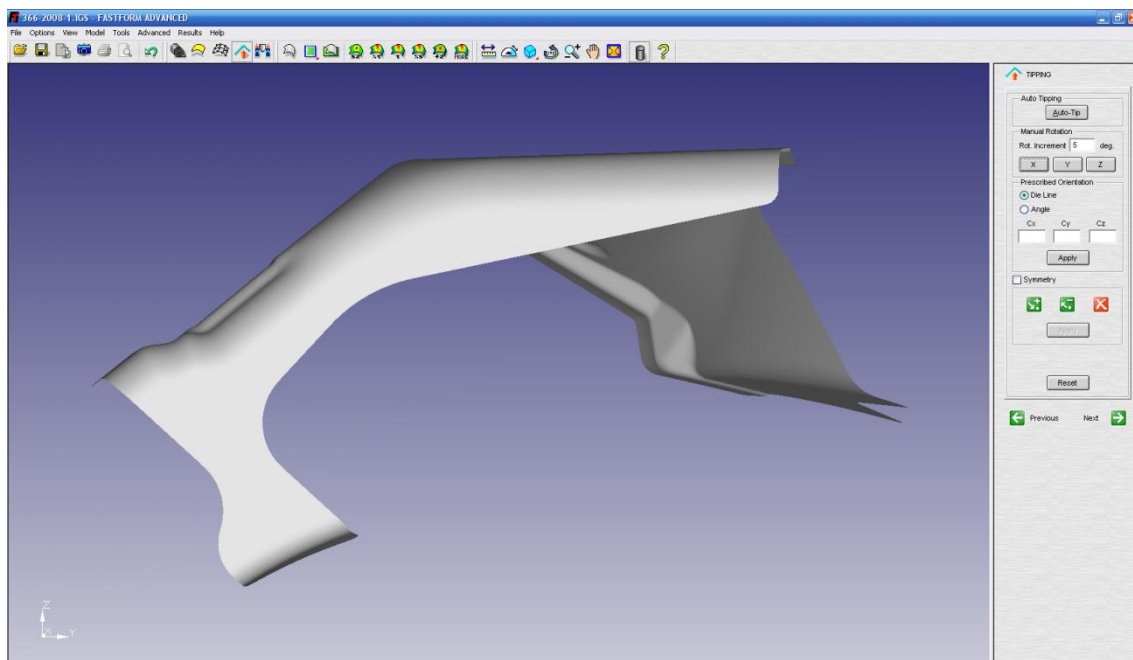


Fig. 4.27 – Tipping da peça E (*Fastform Advanced*)

É muito importante que o *Tipping* seja efectuado correctamente. Consoante o posicionamento da peça poderão existir variações muito significativas nos resultados, em especial na análise ao *springback* da peça.

Neste caso, ao analisar uma ferramenta já fabricada, o posicionamento da peça para esta simulação será o mesmo do projecto da ferramenta. Se fosse na fase inicial do projecto, poder-se-ia realizar simulações variando o posicionamento da peça, de forma a compreender qual o posicionamento que levaria a uma menor deformação elástica da mesma. No seguimento do que foi indicado anteriormente em relação ao tempo de cálculo, as primeiras simulações seriam realizadas com uma *mesh* mais larga e, quando já se estivesse perto do posicionamento ideal, começar-se-ia a apertar a *mesh*.

4.3.3 Resultados

Após concluída a preparação para a simulação, inicia-se o processo de cálculo para a obtenção dos resultados pretendidos. Este processo demorou aproximadamente 4 minutos e foi capaz de gerar diversos resultados que são apresentados de seguida.

O primeiro diz respeito ao planificado da peça (*blank*). O resultado neste caso já era esperado, uma vez que o *software* que foi usado pela empresa para planificar a peça foi o *FastBlank*, que se encontra incluído no *Fastform Advanced*. Mas para além de planificar a peça, o *software* disponibiliza informações importantes, como é o caso da área, do perímetro e do peso do planificado, que podem ser visualizadas no fundo da Fig. 4.28 do lado esquerdo.

É ainda possível determinar qual o contorno óptimo do *blank* a partir de formas geométricas. Na Fig. 4.28 pode-se ainda observar um contorno rectangular assinalado a vermelho a partir do qual é estimado a percentagem de material utilizado. No fundo da imagem do lado direito temos a informação relativa a este contorno, como é o caso da largura e altura do rectângulo e respectiva área, e a percentagem de material utilizado. Outros exemplos de formas geométricas encontram-se apresentados na Fig. 4.29. Estas geometrias não rectangulares são especialmente indicadas para ferramentas transfer.

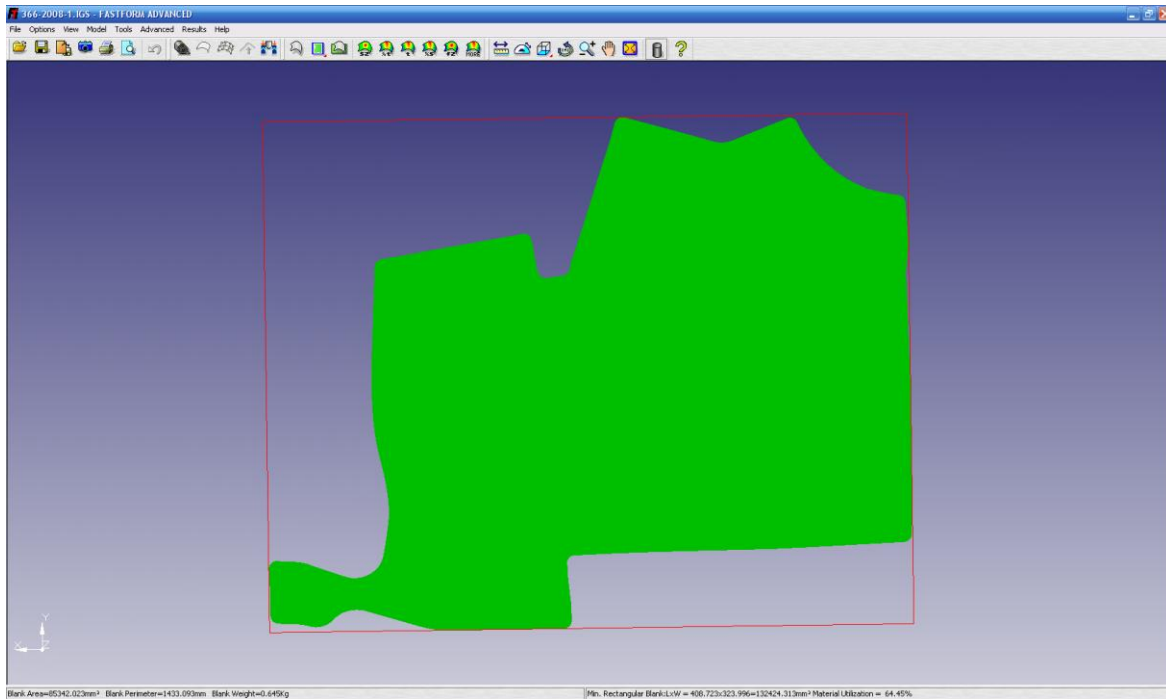


Fig. 4.28 – Planificação da peça E (*Fastform Advanced*)

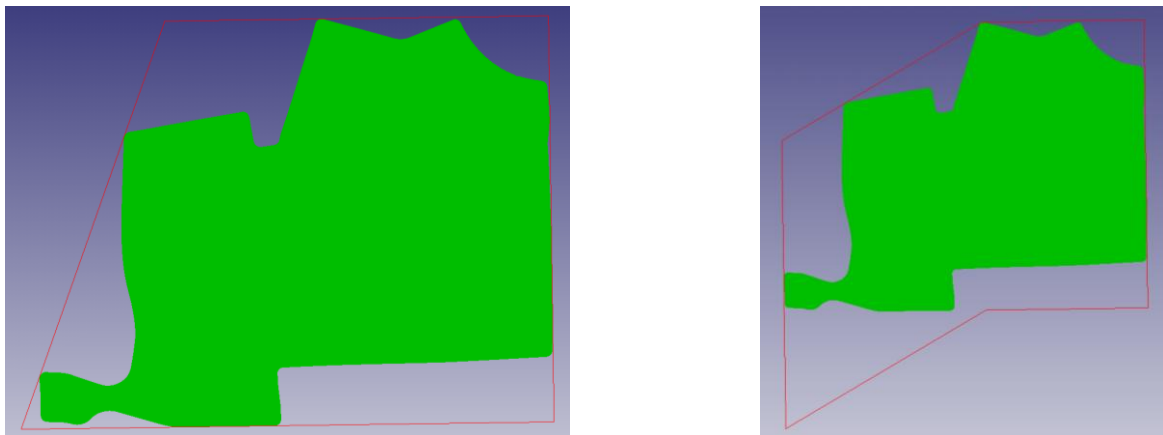


Fig. 4.29 – Planificado da peça E com diferentes geometrias de contorno (*Fastform Advanced*)

Após esta análise é feita a verificação da variação da espessura da peça. Os resultados da simulação serão directamente comparados com os resultados da medição da espessura da peça. Os resultados são apresentados de duas formas distintas. Numa, é indicada a percentagem de variação da espessura da peça relativamente à espessura inicial da chapa (Fig. 4.30), na outra, é apresentada a espessura da peça num determinado ponto (Fig. 4.31 e Fig. 4.33).

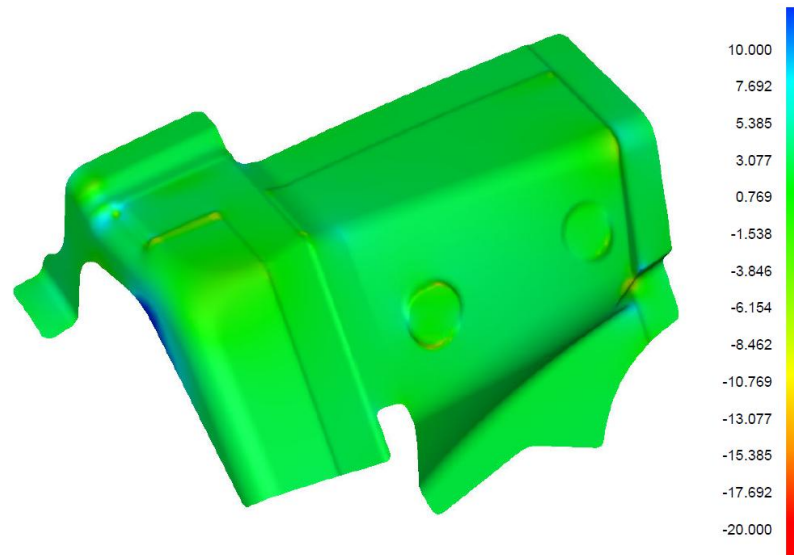


Fig. 4.30 – Percentagem da variação da espessura da peça E (*Fastform Advanced*)

Nas Fig. 4.31 e Fig. 4.33 pode-se observar no canto inferior esquerdo a espessura da peça indicada pelo *software* para um determinado ponto. Esses dois pontos foram depois medidos com um paquímetro (ver Fig. 4.32 e Fig. 4.34), podendo o resultado dessa medição ser observado no visor do mesmo.

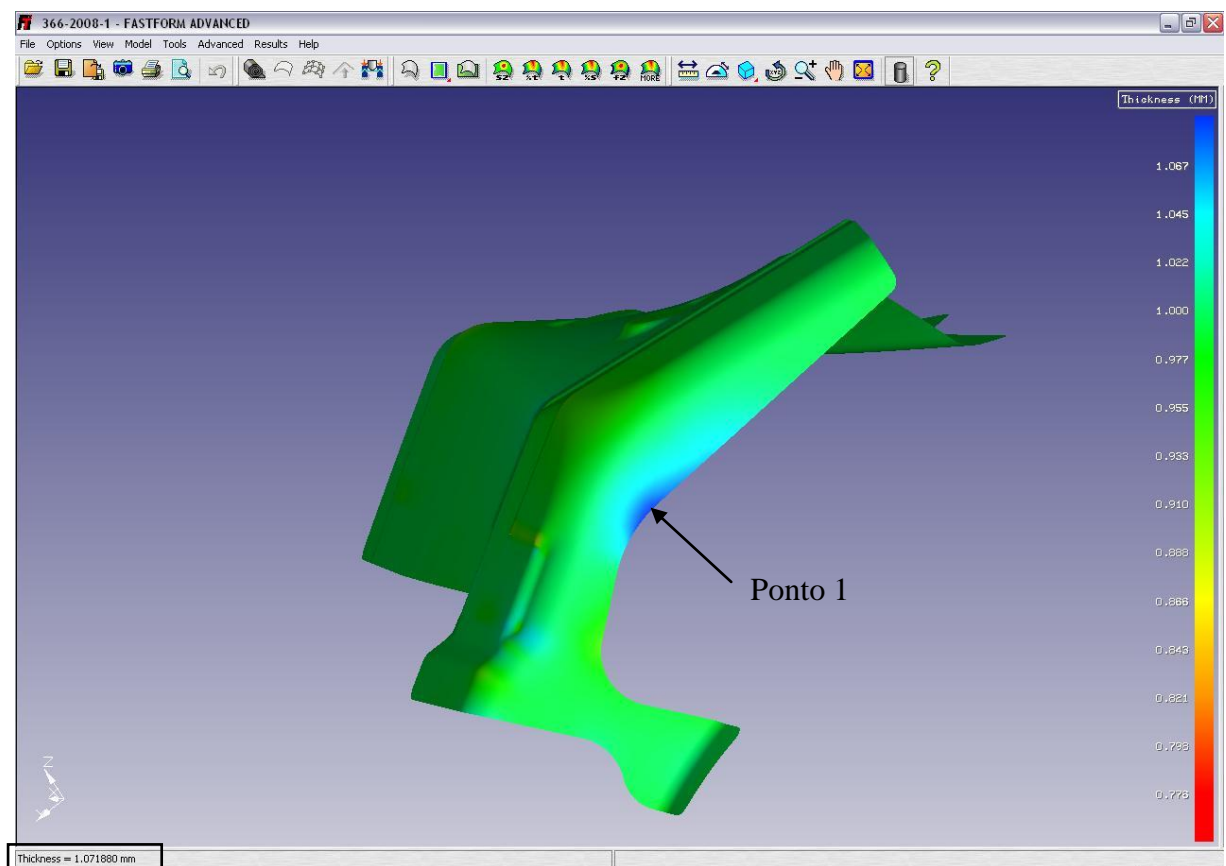


Fig. 4.31 – Espessura da peça E no ponto 1 (*Fastform Advanced*)

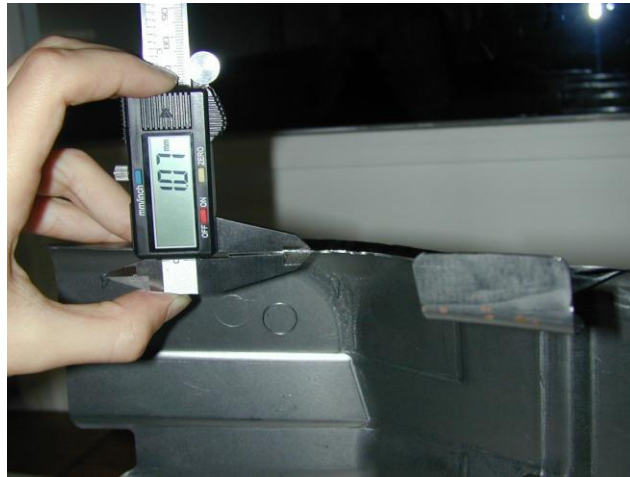


Fig. 4.32 – Fotografia da medição da espessura do ponto 1 (peça E)

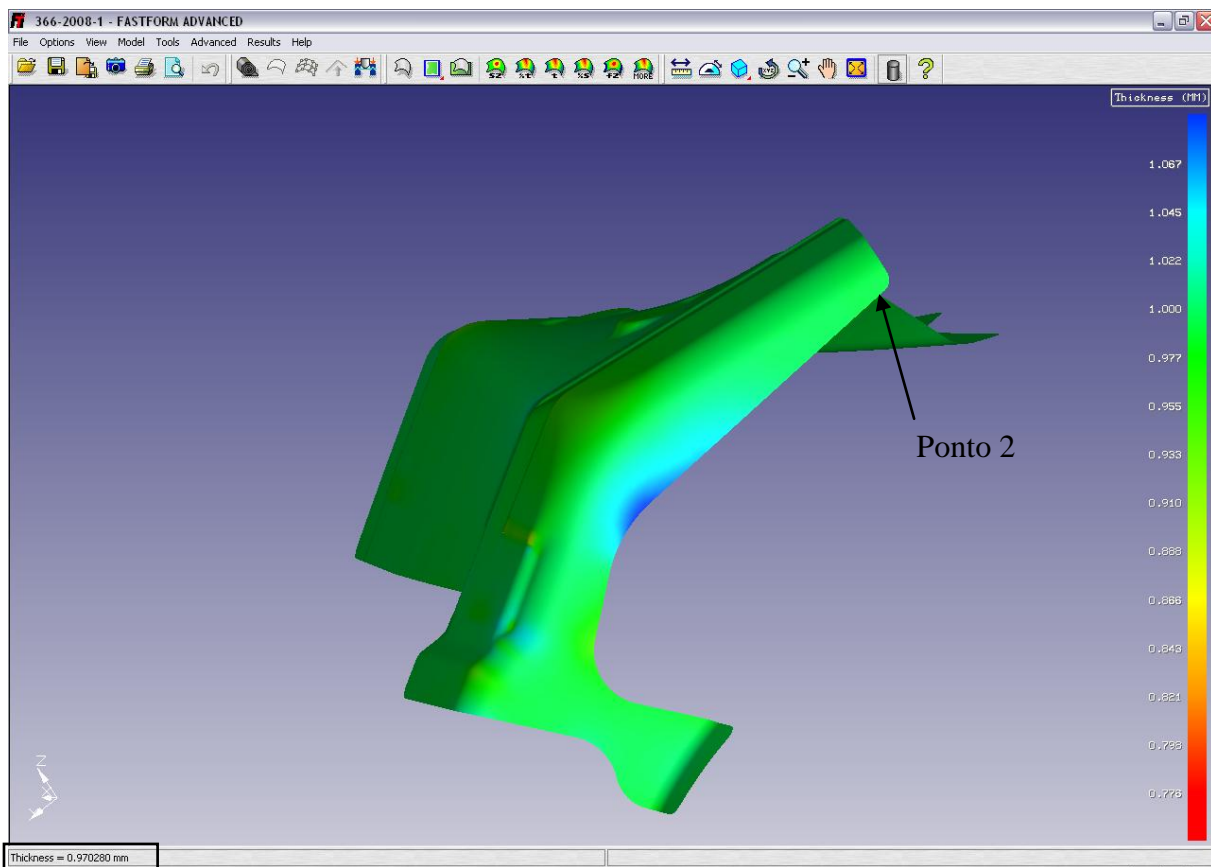


Fig. 4.33 - Espessura da peça E no ponto 2 (*Fastform Advanced*)

Verifica-se que os resultados obtidos através do *software* possuem exactidão, no que diz respeito à variação da espessura da peça, uma vez que a diferença entre os valores obtidos pelo *software* e o paquímetro é praticamente inexistente.



Fig. 4.34 - Fotografia da medição da espessura do ponto 2 (peça E)

Outro resultado obtido refere-se à tensão equivalente da peça (Fig. 4.35). Observa-se que a zona mais crítica da peça é na dobra da peça (ver seta). O facto de essa área apresentar tensões de compressão elevadas é um indício de que aí venha a existir um enrugamento da peça. Tal facto veio a verificar-se tal como se pode comprovar através da Fig. 4.36.

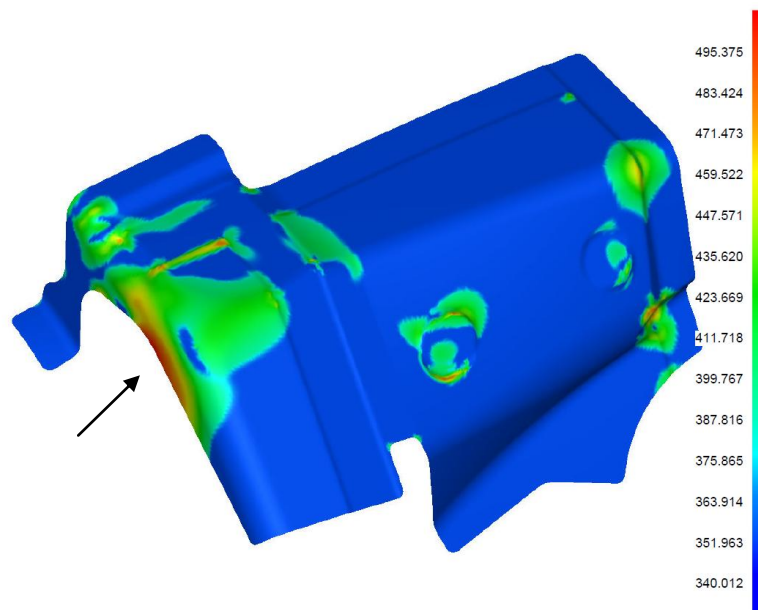


Fig. 4.35 – Tensão equivalente em MPa da peça E (*Fastform Advanced*)

Para terminar a análise ao comportamento da peça E, é ainda necessário gerar os resultados relativos ao *springback* da peça após ser deformada. Como já foi indicado anteriormente, este é um ponto muito importante, visto que estes resultados são difíceis de prever.



Fig. 4.36 – Fotografia de detalhe da sobreposição de material na peça E

Comparativamente ao tempo demorado para gerar os resultados anteriores, o tempo levado para a obtenção destes resultados foi bastante superior. Enquanto anteriormente tinham sido necessários 4 minutos, para esta situação foram precisos aproximadamente 20 minutos.

Os resultados podem ser visualizados de diferentes formas. A forma mais simples de perceber as diferenças encontra-se apresentada nas Fig. 4.37 e Fig. 4.38, onde é possível visualizar a peça antes e depois da abertura da prensa. Outra forma possível de visualizar o springback é através de áreas coloridas na peça. O deslocamento da peça pode ser analisado segundo o eixo X, Y, e Z, ou em 3D (Fig. 4.39).

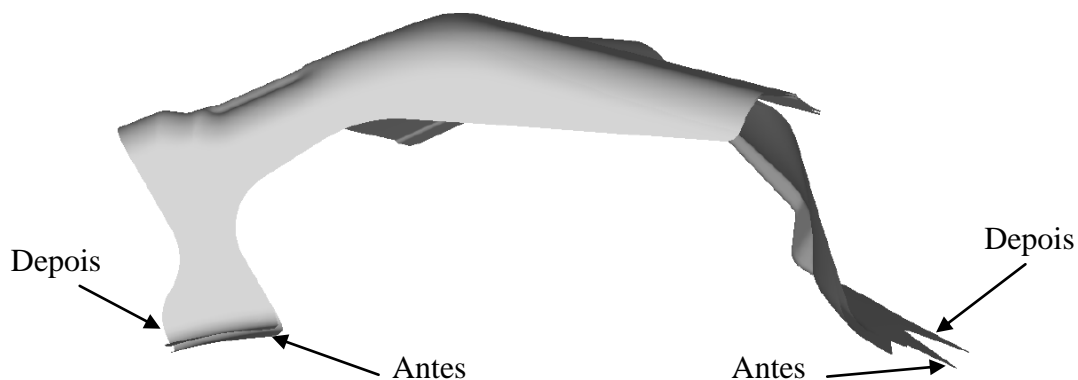


Fig. 4.37 – *Springback* da peça E numa perspectiva lateral da peça (*Fastform Advanced*)



Fig. 4.38 - *Springback* da peça E numa perspectiva frontal da peça (*Fastform Advanced*)

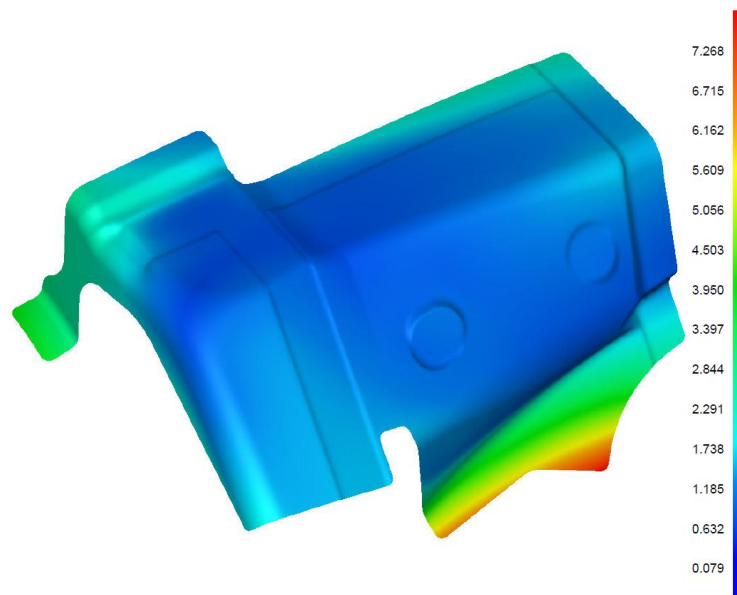


Fig. 4.39 – Deslocamento 3D (mm) do springback da peça E (*Fastform Advanced*)

Comparando os resultados desta simulação com aqueles obtidos da realidade, confirma-se que as zonas da peça mais afectadas foram as assinaladas na Fig. 4.37. No entanto, os valores dos deslocamentos obtidos na realidade são ligeiramente inferiores aos da simulação, em parte devido ao facto destas zonas terem sido compensadas logo na fase de projecto.

Quando os resultados foram apresentados ao grupo de trabalho, todos foram unânimes em afirmar que estes teriam sido uma mais-valia na concepção da ferramenta, uma vez que com estes resultados teriam dado uma compensação maior do que a que foi originalmente dada às zonas afectadas.

4.3.4 Conclusões

Terminada a simulação chega-se a duas conclusões fundamentais. A primeira, refere-se aos resultados obtidos que demonstram ter exactidão e fiabilidade elevada; a segunda, refere-se à obrigatoriedade da preparação da peça para que a simulação seja realizada com o máximo rigor possível para obter tais resultados.

No que se refere à preparação da peça, é essencial definir o material e todas as propriedades correctamente, gerar uma *mesh* com as dimensões adequadas ao modelo. No caso de existirem forças localizadas ao longo do *blank* é fundamental indicá-las. Por fim, mas não menos importante, é necessário colocar a peça na mesma posição que se encontra na prensa. Se a ferramenta ainda não estiver desenhada, pode experimentar-se diversas posições de maneira a encontrar aquela que produz menos deformações na peça.

Relativamente aos resultados, este teste foi bastante satisfatório. Em poucos minutos foi possível: gerar o contorno teórico da peça (*blank*) muito idêntico ao contorno final; verificar a variação da espessura ao longo da peça, com uma exactidão ao centésimo de milímetro; e analisar a tensão equivalente ao longo da peça, que permitiu identificar uma zona de potencial enrugamento como se veio a verificar na realidade. No fim, e após novo período de cálculos, obteve-se os resultados referentes ao *springback* da peça. Segundo o grupo de trabalho, estes resultados são plausíveis e teriam sido uma mais-valia na altura da concepção da ferramenta.

4.4 Caso 3- Análise Experimental ao *eta/Dynaform*

4.4.1 Introdução

Nos dois casos de estudo anteriores analisou-se o potencial dos *software* para o desenho da ferramenta, e para a previsão precoce do comportamento da peça. Neste terceiro e último caso de estudo analisa-se o potencial do *Dynaform* na afinação da ferramenta, por exemplo, no ajuste da altura entre o pisa e a matriz. Nesta situação estuda-se o comportamento da peça F (ver Fig. 4.40) e valida-se a ferramenta. O projecto desta ferramenta foi realizado por uma empresa exterior que depois adjudicou a obra à APAL.



Fig. 4.40 – Fotografia da peça F

A peça F é produzida através de uma ferramenta transfer com cinco operações. As cinco operações encontram-se descritas na Tabela 4.5 e podem ser vistas através da Fig. 4.41.

Tabela 4.5 – Sequência de fabrico da peça F

Operação N°	Função
OP. 10	Corte do planificado
OP. 20	1º Embutido
OP. 30	Corte
OP. 40	2º Embutido
OP. 50	Furação

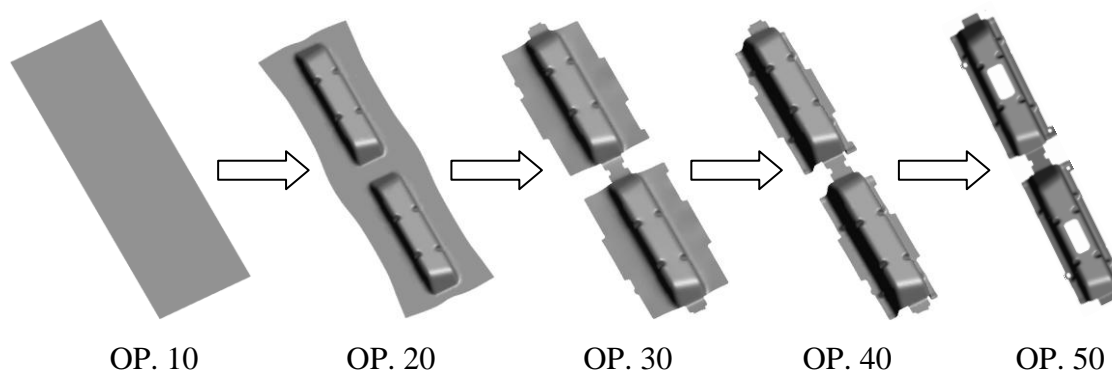


Fig. 4.41 – Sequência de fabrico da peça F

Este estudo vai focar-se na análise da operação OP. 20, que corresponde ao primeiro embutido da chapa e a uma das fases mais críticas no fabrico da peça. Através do *Dynaform*

serão feitas as mesmas afinações na ferramenta que aquelas realizadas no ensaio físico. Os resultados de ambos serão depois comparados e discutidos.

À semelhança do caso anterior, ao longo do estudo são apresentados todos os passos necessários para a obtenção dos resultados e registados os tempos de cada operação. Uma vez que os tempos de cálculo da simulação variam consoante as características de cada computador, na Tabela 4.6 encontram-se as características essenciais do computador usado neste estudo.

Tabela 4.6 - Características do computador usado no caso 3

Processador:	Intel Core2 Duo CPU 2.50 GHz
Memória:	3.00 GB de RAM
Sistema Operativo:	Windows Vista Home Premium

4.4.2 Preparação da Simulação

Nos casos anteriores a simulação era realizada através do método inverso, ou seja, o *input* necessário para a simulação correspondia à peça final. Neste caso os inputs são os componentes da ferramenta (punção, matriz e pisa) e a geometria da chapa plana (*blank*).

A primeira etapa consiste em importar para o *Dynaform* as geometrias dos componentes da ferramenta e da chapa indicados em cima, e de seguida realizar a *mesh* adequada a cada elemento. Nas Fig. 4.42, Fig. 4.43, Fig. 4.44 e Fig. 4.45 é possível observar as quatro geometrias necessárias à simulação após a *mesh* ter sido realizada.

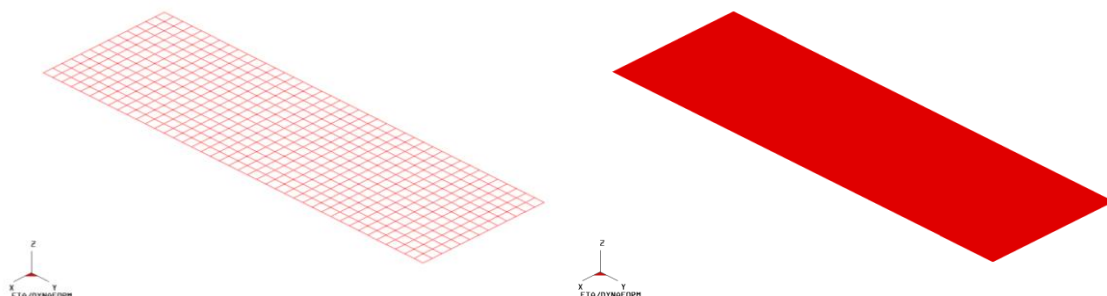


Fig. 4.42 – Geometria da chapa plana (Caso 3)

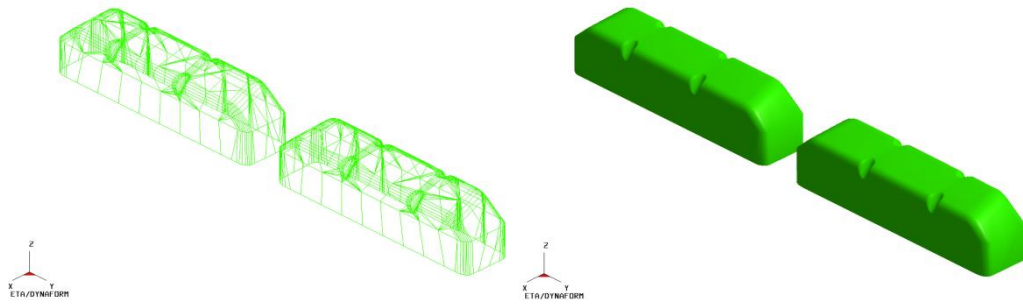


Fig. 4.43 – Geometria do punção (Caso 3)

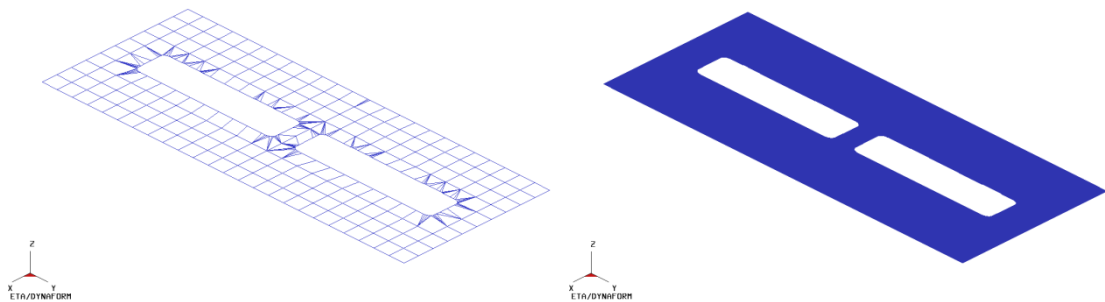


Fig. 4.44 – Geometria do pisa (Caso 3)

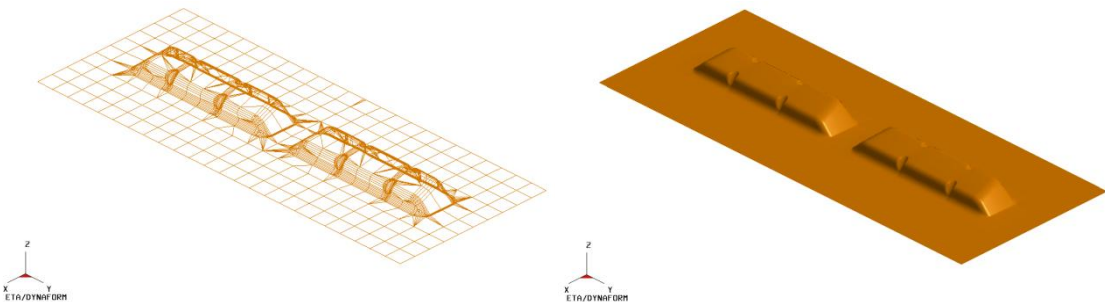


Fig. 4.45 – Geometria da matriz (Caso 3)

O tempo gasto nesta primeira etapa foi de aproximadamente 10 minutos. A etapa seguinte consiste no *setup* da ferramenta. É nesta fase que se fazem todas as afinações necessárias à ferramenta. No menu de *setup* inicial (Fig. 4.46) é indicado o tipo de simulação (*Sheet forming*), a espessura da chapa (0,8 mm), o tipo de prensa (*Single action*) (ver Fig. 4.47) e as geometrias originais da ferramenta (*Upper & Lower*). Isto significa que se vai utilizar tanto a geometria do punção como a da matriz, ao invés de usar apenas uma das geometrias e depois fazer um *offset* da mesma para obter a outra.

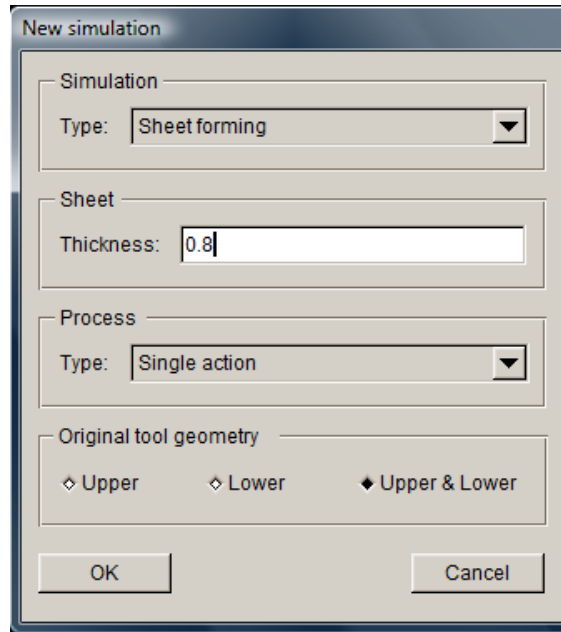


Fig. 4.46 – Menu de *setup* inicial (Caso 3)

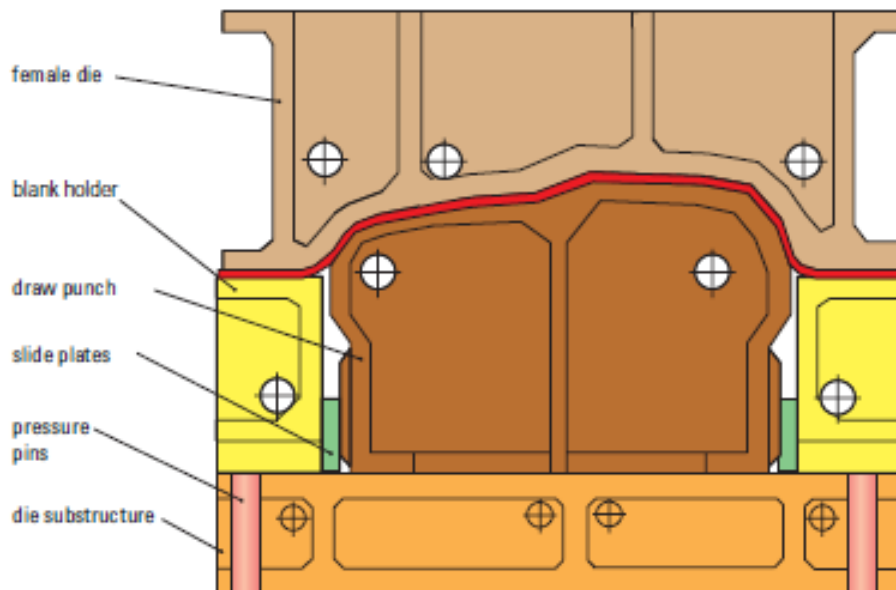


Fig. 4.47 – Prensa do tipo *single action*

Após o menu de *setup* inicial, passa-se para o *setup* de diferentes submenus. Aqui define-se o material da chapa, a posição inicial de cada componente, a distância entre componentes com a prensa fechada, a velocidade de fecho da ferramenta, etc. Na Fig. 4.48 estão apresentados alguns submenus de afinação da ferramenta.

O *Dynaform* possui uma biblioteca extensa de materiais, sendo que o material da peça F vinha já incluído, caso contrário seria necessário introduzi-lo.

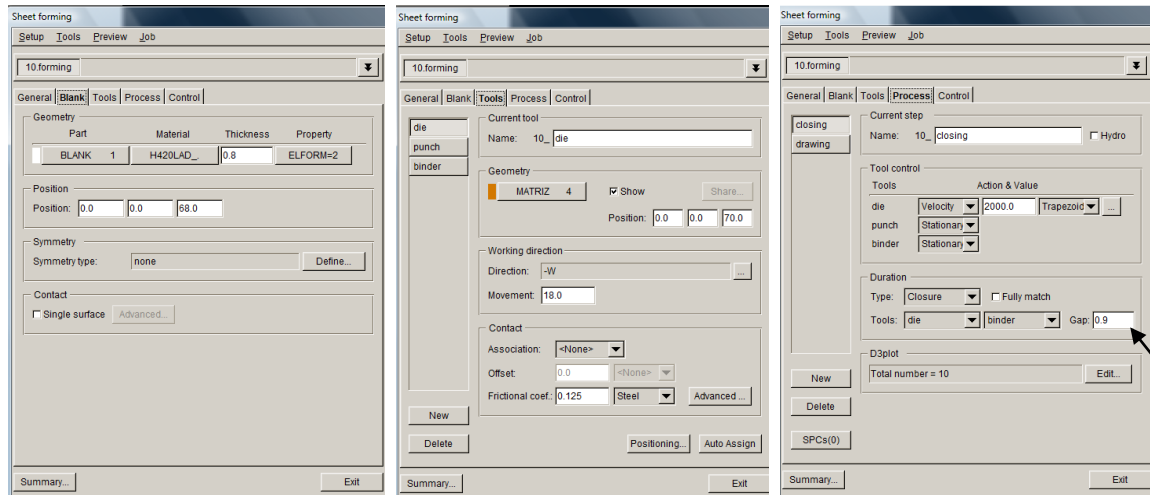


Fig. 4.48 – Submenus de setup (Caso 3)

Foram realizadas duas simulações distintas, uma com uma distância de 0,80 mm entre a matriz e o pisa, ou seja sem qualquer folga, e outra com 0,90 mm, logo com 0,10 mm de folga o que vai permitir que a chapa escorregue mais facilmente.

Nesta segunda etapa, ou seja no *setup* da ferramenta, foram necessários cerca de 10 minutos para a preparação da primeira simulação e 1 minuto para a segunda simulação, visto ser apenas necessário alterar um parâmetro.

Terminada a preparação da simulação (Fig. 4.49 e Fig. 4.50) dá-se início à fase de cálculos; é aqui que entra o *solver* LS-DYNA em acção (Fig. 4.51). O cálculo de cada simulação demorou aproximadamente 5 minutos.

Uma vez concluídos os cálculos, os resultados da *Formability Simulation* são gravados no disco rígido, e poderão ser analisados posteriormente através do programa *Eta Post Processor*. No subcapítulo 4.4.3 são apresentados alguns destes resultados.

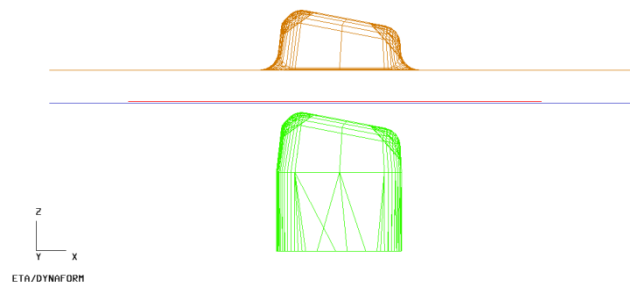


Fig. 4.49 – Ferramenta preparada para simulação (vista lateral) (Caso 3)

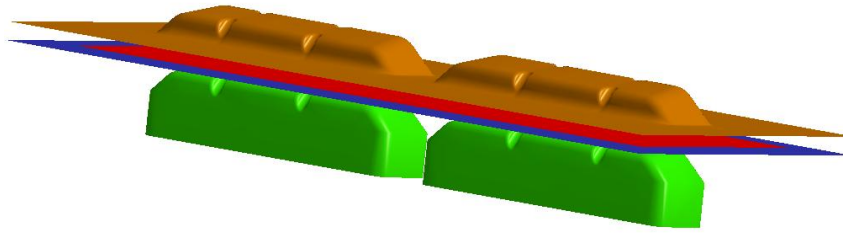


Fig. 4.50 – Ferramenta preparada para simulação em perspectiva 3D (Caso 3)

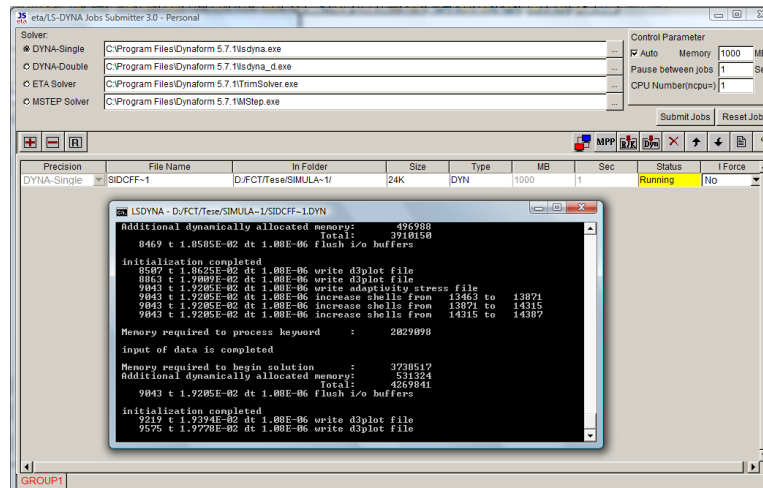


Fig. 4.51 – O solver LS-DYNA a realizar o cálculo da simulação

4.4.3 Resultados

É chegada a altura de comparar os resultados da simulação com os do ensaio físico. Através do *Eta Post Processor* é possível visualizar *frame a frame* o comportamento da chapa ao longo da estampagem (Fig. 4.52).

A) Espaçamento de 0,80 mm entre a matriz e o pisa

Durante o ensaio físico com um espaçamento de 0,80 mm a chapa entrava em rotura num dos cantos e apresentava algum enrugamento nas pontas da peça. Comparando as Fig. 4.53 e Fig. 4.54 verifica-se que as semelhanças são muito significativas. Na zona em que existe rotura de chapa, o resultado da simulação indica que há risco desta ocorrência. Quando se observa o gráfico FLD no canto superior esquerdo da imagem, verifica-se que esses pontos estão muito próximos da linha limite de rotura. Isto significa que naquela zona há uma forte possibilidade de entrar em rotura, como se veio a verificar na realidade. Nas zonas em que na

fotografia se observa o enrugamento de chapa, também se verifica na figura da simulação um enrugamento semelhante.

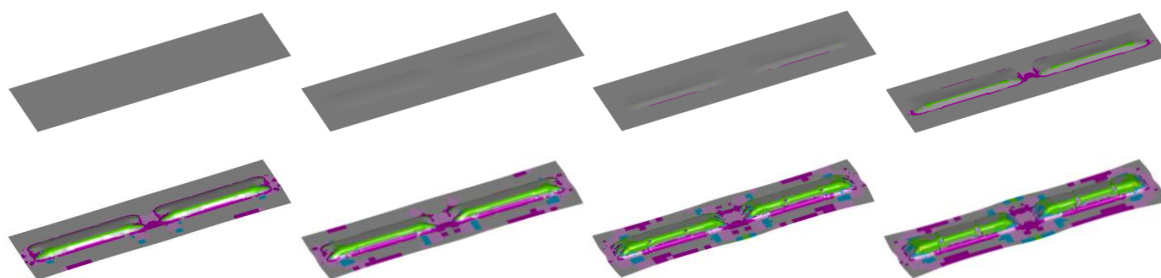


Fig. 4.52 – 8 Frames da simulação à *Formability Simulation* da peça F (0,80 mm)

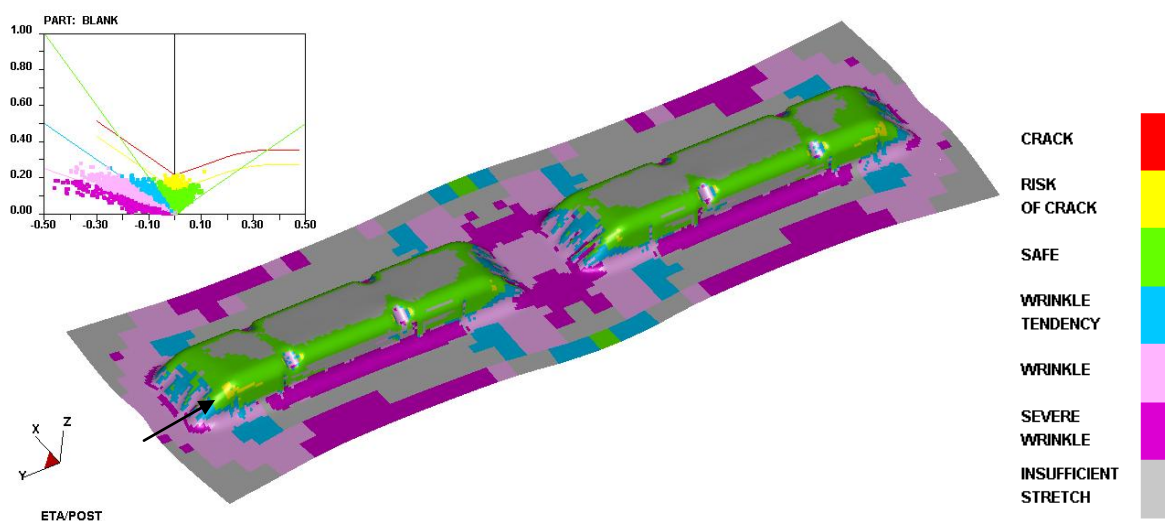


Fig. 4.53 – *Frame final* da simulação à *Formability Simulation* da peça F (0,80 mm)



Fig. 4.54 – Fotografia da operação OP. 20 da peça F (0,80 mm)

B) Espaçamento de 0,90 mm entre a matriz e o pisa

À semelhança do caso anterior, os resultados da simulação apresentam uma fiabilidade elevada quando comparados com os resultados reais. Na zona em que com o espaçamento de 0,80 mm a chapa estava a ruir, a simulação indica que a probabilidade de vir a entrar em rotura é muito pequena, o que mais uma vez se veio a verificar ser verdade (Fig. 4.55 e Fig. 4.56).

Em relação ao enrugamento da chapa nota-se que é superior ao apresentado na simulação com espaçamento de 0,80 mm, o que é normal que venha a acontecer dado o maior espaço existente entre a matriz e o pisa.

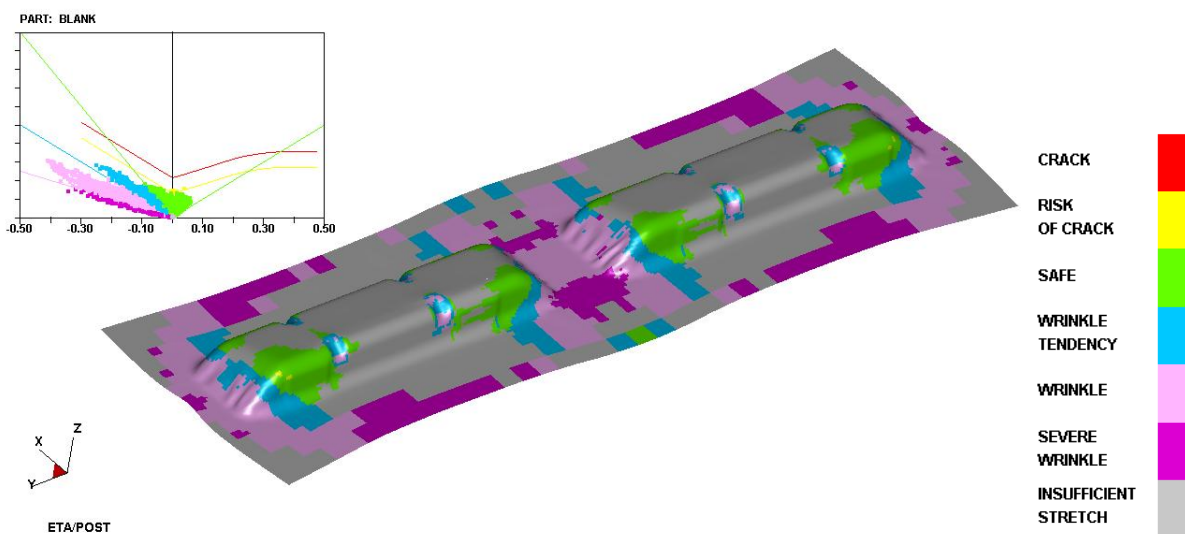


Fig. 4.55 - Frame final da simulação à *Formability Simulation* da peça F (0,90 mm)



Fig. 4.56 - Fotografia da operação OP. 20 da peça F (0,90 mm)

C) *Análise de Custos*

Através de uma análise de custos pretende-se perceber a potencial poupança na aplicação da simulação na afinação prévia da ferramenta. Na Tabela 4.7 encontra-se apresentado uma estimativa de custo dos ensaios físicos.

Tabela 4.7 – Estimativa de custo dos ensaios físicos (Caso 3)

Descrição	Nº de horas gastas	Custo/hora (€)
Mão-de-obra	30	30€
Prensa	10	90€
		TOTAL: 1800€

Tendo em conta que o tempo gasto nas duas simulações realizadas, na preparação, no cálculo e na análise dos resultados, foi de aproximadamente 40 minutos, nota-se que existe um potencial elevado de poupança na aplicação da simulação.

Num único dia é possível simular diversas configurações diferentes, indo à procura da configuração ideal.

4.4.4 Conclusões

Este caso de estudo permitiu demonstrar que a aplicação de *software* de simulação pode ser uma mais-valia na redução dos custos, e no aumento da qualidade da peça final. Os resultados obtidos virtualmente vão ao encontro daqueles obtidos através do ensaio físico. Este facto faz com que se possa afirmar que o *Dynaform* é um *software* fiável para a afinação virtual da ferramenta.

A utilização do *software* é simples e intuitiva. Em apenas alguns minutos consegue-se ter uma ferramenta pronta para simulação, sendo apenas necessário ter os elementos base essenciais (punção, *blank*, etc.) previamente desenhados em CAD.

O tempo de cálculo para este exemplo (5 minutos) acabou por ser uma surpresa pela positiva. Deste modo é possível fazer um número grande de experiências num intervalo curto de tempo, utilizando o *software* não apenas para a concepção de ferramentas que produzam peças minimamente aceitáveis, mas também na procura de ferramentas capazes de produzir

peças com uma qualidade ainda superior. Este procedimento é totalmente impensável quando se utiliza unicamente o ensaio físico, dado os custos elevados.

Para além dos resultados da *formability simulation* apresentados, o *Dynaform* fornece uma série de outros resultados de igual importância quando se pretende fazer a melhor análise possível ao comportamento da peça, nomeadamente, variação da espessura da peça, deslocamentos, tensões, etc..

Por fim, é sem dúvida necessário destacar a poupança potencial apresentada na análise de custos (1800 €). No caso de aplicação do *Dynaform* para todo o ciclo de desenvolvimento da ferramenta, este é um valor muito significativo que, somando a uma possível poupança ainda superior, faz com que muito dificilmente a aplicação deste *software* não venha a ser uma opção economicamente viável.

5 Conclusões

Este estudo tinha como objectivo perceber até que ponto a aplicação de *software* CAD/CAE poderia ser útil na concepção de ferramentas de estampagem para uma dada empresa. Através da análise dos resultados apresentados, chega-se à clara conclusão de que existe um potencial elevado no uso destes *software*.

Com o evoluir da indústria, o tradicional método de tentativa-erro tornou-se uma solução de maior risco. O aparecimento de novos materiais e de geometrias mais complexas, faz com que seja mais complicado cumprir os prazos, não aumentar os custos e manter o nível de qualidade final das peças.

Foram apresentados neste estudo seis *software* especializados para a indústria de estampagem. A distinção feita entre *software* autónomos e não autónomos, demonstrou-se ser importante, visto terem fins de utilização diferentes. Os *software* não autónomos, são *software* essencialmente de CAD e como tal destinados a acelerar o processo de desenho da ferramenta. Os *software* autónomos, são essencialmente *software* de CAE, onde a principal função é simular o comportamento do material durante a estampagem.

Os três casos de estudo criteriosamente seleccionados foram essenciais para a obtenção destas conclusões finais.

O caso 1 permitiu perceber que os *software* não autónomos são uma ajuda no desenho das ferramentas, permitindo acelerar o processo, no entanto, a sua aplicação está essencialmente limitada para o uso em peças simples.

O caso 2 demonstrou que mesmo um *software* de “entrada de gama” (uso do método inverso) é uma ferramenta importante quando aplicada correctamente. Ao comparar os resultados da simulação com os resultados do ensaio físico, verificou-se uma grande igualdade entre ambos.

O terceiro e último caso, permitiu testar um *software* “topo de gama” na simulação da estampagem. Com este tipo de *software* é possível simular passo a passo todo o processo de estampagem. Neste caso utilizou-se o *software* para afinar a ferramenta, e os resultados alcançados levam a crer que o uso destes *software* pode levar a uma significativa poupança nos gastos, como também vir a aumentar a qualidade das peças finais.

Embora os *software* continuem a evoluir cada vez mais, a necessidade de aplicação dos mesmos durante a fase de concepção da ferramenta é, no presente, uma realidade que as empresas não podem ignorar.

Como conclusão para a empresa, recomenda-se a utilização de *software* autónomos e a adopção de procedimentos organizativos, que promovam a participação de um grupo de trabalho multifuncional na discussão e aprovação das soluções conceptuais a adoptar para o projecto das ferramentas.

Como trabalho futuro, seria recomendável expandir este trabalho com a aplicação de um destes *software* (*Autoform* ou *Dynaform*) desde o início do projecto de concepção da ferramenta, seguindo a metodologia de trabalho apresentada no capítulo 3.

6 Bibliografia

- [1] D. Tang, W. Eversheim, G. Schuh, and K.-S. Chin, "Concurrent metal stamping part and die development system," *Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part B: Journal Engineering Manufacture*, pp. 805-825, 2003.
- [2] A. Hedrick, "Sheet Metal Stamping 101 - Part 1: Who does what?," 2009. [Online]. http://www.thefabricator.com/ToolandDie/ToolandDie_Article.cfm?ID=2144
- [3] CAR and Altarum, "A Collaborative Business Model for the Tool and Die Industry," 2002.
- [4] K. Dzikczek, J. Baron, and D. Luria, "The World Class Tool Shop and its Prospects in Michigan," Center for Automotive Research; Michigan Manufacturing Tecnology Center, 2006.
- [5] P. Villers, "Introducing MCAE: Expert Tools for Engineering," *Computers in Mechanical Engineering*, 1987.
- [6] M. Tisza, Z. Lukács, and G. Gál, "Integrated Process Simulation and Die-Design in Sheet Metal Forming," in *ESAFORM 2008*, 2008, pp. 185-188.
- [7] J. L. Alves, *Simulação Numérica do Processo de Estampagem de Chapas Metálicas*. Guimarães: Escola de Engenharia - Universidade do Minho, 2003.
- [8] A. Tang, W. Lee, J. He, and C. C. Chen, "The Evolution of Sheet Metal Forming Simulation in Stamping Industry," in *9th International LS-DYNA Users Conference*, Detroit, 2006.
- [9] J. Corbertt, "Product Development," *Production Engineer*, Nov. 1988.
- [10] T. Dutton, "Review of Sheet Metal Forming Simulation - Progress to Date, Future Developments," in *8th International LS-DYNA Users Conference*, 2004.
- [11] eta, "eta/DYNAFORM User's Manual Version 5.6," 2007.
- [12] (2010) Forming Technologies Incorporated. [Online]. <http://www.forming.com/>

- [13] (2010) Autoform. [Online]. <http://www.autoform.com/>
- [14] A. M. Solutions, "Simulation helps you get it right," pp. 38-40, Nov. 2007.
- [15] S. Al Azraq, R. Teti, and J. Costa, "Springback prediction with FEM analysis of advanced high strength steel stamping process," in *IPROMS 2006*, 2006.
- [16] D. Xu and J. Kosek, "Application of Scrap Shedding Simulation in Stamping Manufacturing," in *10th International LS-DYNA® Users Conference*, Detroit, 2007.
- [17] eta, "eta/DYNAFORM 5.7 Brochure," 2009.
- [18] Logopress3, *Technical Overview*. 2008.
- [19] (2009) Swiss Venture Club. [Online]. http://www.swiss-venture-club.ch/de/i/wirtschafts_zuerich_content---1--1042.html
- [20] (2010) eta. [Online]. <http://www.eta.com/>
- [21] V. Pereira, "Definição e implementação de um sistema de orçamentação de ferramentas de estampagem," DEMI-FCT-UNL Relatório Interno de Projecto, 2007.
- [22] M. D. Maginn, *Managing in Times of Change*. McGraw-Hill, 2005.